

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Нейтронно-физический расчёт реактора типа УГР тепловой мощностью 180 МВт

УДК 621.039.577:621.039.512

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Колесников Е. В.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
 ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ **Бычков П.Н.**
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Колесников Е. В.

Тема работы:

Нейтронно-физический расчёт реактора типа УГР тепловой мощностью 180 МВт	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№1550/с от 27.02.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	– Тип реактора: УГР – Тепловая мощность реактора: 180 [МВт] – Ядерное горючее: UC – Обогащение топлива по U-235: 3,5 [%] – Теплоноситель: Na – Температура теплоносителя на входе: 300 [°C] – Температура теплоносителя на выходе: 520 [°C] – Материал оболочек твэлов и кассет: сталь 1X18H9T
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	– Выбор конструктивной схемы – Расчёт «холодного» состояния реактора – Оптимизация параметров реактора – Расчёт «холодного и горячего» состояний реактора в программе WIMS-D5B – Сравнение результатов

Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> – Презентация – Сборочный чертеж – Спецификация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:	
1 Особенности конструкций различных типов реактора и выбор основных элементов активной зоны	
2 Нейтронно-физический расчет реактора типа УГР	
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
4 Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Колесников Е.В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Колесников Е.В.

Школа	ИЯТШ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5,748 руб. за 1 кВт·ч.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Организация и планирование работ	– Расчет продолжительности этапов работ; – Построение линейного графика работ; – Расчет накопления готовности проекта.
2. Расчет сметы затрат на выполнение проекта	
3. Оценка экономической эффективности	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Линейный график работ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В. Ю.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Колесников Е.В.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0A5B	Колесников Е. В.

Школа	ИЯТШ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, излучение); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (причины, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5B	Колесников Е.В.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) 14.03.02. Ядерные физика и технологии

Уровень образования высшее

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

Период выполнения (весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.04.2019	<i>Выдача задания</i>	
25.04.2019	<i>Выбор конструктивной схемы</i>	
03.05.2019	<i>Расчёт «холодного» состояния реактора</i>	
04.05.2019	<i>Оптимизация параметров реактора</i>	
07.05.2019	<i>Расчёт «горячего» состояния реактора в программе WIMS-D5</i>	
13.05.2019	<i>Сравнение результатов</i>	
03.06.2019	<i>Сдача работы</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Чертков Ю.Б.	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.

Код результата	Результат обучения (компетенции)
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 95 с., 16 рис., 17 табл., 31 источник, 7 прил., 1 чертеж, 1 спецификация.

Ключевые слова: уран-графитовый реактор, отравление, выгорание, шлакование, карбид урана, нейтронно-физический расчёт.

Объектом исследования является ядерный реактор тепловой мощностью 180 МВт с топливом УС и обогащением 3,5 %, теплоноситель – натрий.

Цель работы – определение основных нейтронно-физических характеристик реактора типа УГР тепловой мощностью 180 МВт.

В ходе исследования произведен предварительный расчёт геометрических размеров активной зоны и скорость теплоносителя, нейтронно-физический расчёт «холодного» состояния реактора и влияние разогрева до рабочих температур на запас реактивности, расчёт «холодного» и «горячего» состояний реактора с применением программы WIMS-D5B, оценены влияние стационарного отравления ксеноном и длительность кампании, оценена финансовая составляющая работа и описаны внешние факторы, оказывающие влияние на исследование, а так же проведена оценка вредных и опасных факторов, связанных с выполнением данной работы.

Основные конструктивные технологические и технико-эксплуатационные характеристики: реактор типа УГР, тепловая мощность – 180 МВт, ядерное топливо – УС, обогащение 3,5 %, теплоноситель – натрий, ТВЭЛы – стержневые с наружным охлаждением, материал оболочек ТВЭЛОВ и кассет – сталь марки 1Х18Н9Т.

Область применения: ядерная энергетика.

Обозначения и сокращения

УГР – уран-графитовый реактор

АЭС – атомная электростанция;

КМ – конструкционные материалы;

РБМК-1000 – реактор большой мощности канальный электрической мощностью 1000 МВт;

ТВС – тепловыделяющая сборка;

Твэл – тепловыделяющий элемент;

ТК – технологический канал;

ТН – теплоноситель;

СУЗ – система управления и защиты;

K_{∞} – коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде;

$K_{\text{эфф}}$ – коэффициент размножения нейтронов в конечной среде (эффективный коэффициент размножения нейтронов);

ТЭР – температурный эффект реактивности;

WIMS – Winfrith Improved Multigroup Scheme;

ЖМТ – жидкометаллический теплоноситель;

МЧС – министерство чрезвычайных ситуаций;

ПЭВМ – прикладная электронно-вычислительная машина;

ВЧ – высокие частоты;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭМП – электромагнитное поле.

Содержание

Обозначения и сокращения	12
Введение	16
1 Особенности конструкций различных типов реактора и выбор основных элементов активной зоны	18
1.1 Уран-графитовые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем	18
1.2 Конструкционные особенности уран-графитовых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем	19
2 Нейтронно-физический расчет реактора типа УГР	20
2.1 Предварительный тепловой расчет	20
2.2 Физический расчет реактора	25
2.3 Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора	26
2.4 Расчет бесконечного коэффициента размножения	30
2.4.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах	31
2.4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов	32
2.4.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе	34
2.5 Расчет эффективного коэффициента размножения	34
2.6 Оптимизация	37
2.7 Температурные эффекты реактивности	40
2.7.1 Зависимость поперечных сечений от температуры	40
2.7.2 Расчет эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора. .	43
2.8 Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D546	
2.8.1 Расчет «холодного» реактора	46
2.8.2 Расчет «горячего» реактора	50

2.8.3 Расчет гомогенной ячейки	51
2.9 Расчет ТЭР при различных условиях эксплуатации	53
2.10 Сравнение полученных данных.....	55
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	57
3.1 Организация и планирование работ	57
3.1.1 Продолжительность этапов работ	58
3.1.2 Расчет накопления готовности проекта	61
3.1.3 Расчет сметы на выполнение проекта	62
3.1.4 Расчет затрат на материалы	63
3.1.5 Расчет заработной платы.....	63
3.1.6 Расчет затрат на социальный налог	65
3.1.7 Расчет затрат на электроэнергию	65
3.1.8 Расчет амортизационных расходов	66
3.1.9 Расчет прочих расходов	67
3.1.10 Расчет общей себестоимости разработки.....	67
3.1.11 Расчет прибыли.....	68
3.1.12 Расчет НДС	68
3.1.13 Цена разработки ВКР	68
3.1.14 Оценка экономической эффективности проекта	69
4 Социальная ответственность	70
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	71
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней	72
опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	72
4.2.1 Организационные мероприятия.....	72

4.2.2 Технические мероприятия	73
4.3 Условия безопасной работы	75
4.4 Электробезопасность	77
4.5 Пожарная и взрывная безопасность	79
Заключение	81
Список использованной литературы.....	83
Приложение А	87
Приложение Б.....	88
Приложение В	89
Приложение Г.....	91
Приложение Д	93
Приложение Е.....	94
Приложение Ж	95

Введение

На сегодняшний день энергия, получаемая посредством деления тяжелых ядер, занимает серьезную долю всей энергии, вырабатываемой на электростанциях в России и мире. Ядерная энергетика является наиболее экологичной по сравнению с традиционной энергетикой, в которой принято сжигать органическое топливо. А также энергия, получаемая на АЭС, имеет относительно невысокую цену.

Но помимо множества плюсов, которые несет ядерная энергия, есть ряд минусов, которые нельзя игнорировать. Некоторые из них это то, что многократно увеличивается ответственность за оборудование в целом, его предварительный расчет, создание ЯЭУ и дальнейшая ее эксплуатация. При регламентированном использовании реактора, он является безопасным для людей и окружающей среды, но существует риск непредвиденных ситуаций, вызванных как по вине людей, так и по недостаткам конструкции, которые могут повлечь за собой очень серьезные последствия. Поэтому особо важным является недопущение ошибок в расчетах и учет всевозможных параметров и ситуаций.

Заключение о возможности проектирования реактора, независимо от его типа, обогащения, теплоносителя, замедлителя, можно сделать только после детального как нейтронно-физического, так и теплогидравлического расчетов, включающих в себя большую базу данных о состоянии реактора в стационарном или не стационарном состоянии, что необходимо для обеспечения безопасной эксплуатации энергетической установкой.

Целью данной работы является определение нейтронно-физических параметров ЯР типа УГР тепловой мощностью 180 МВт.

Исходя из поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести предварительный расчет уран-графитового реактора с жидкометаллическим теплоносителем, по которому можно оценить скорость протекания жидкого натрия через активную зону;

- провести расчет бесконечного и эффективного коэффициентов размножения;
- выполнить оптимизацию элементарной ячейки для достижения наивысшего значения бесконечного коэффициента размножения;
- рассчитать температурный эффект реактивности;
- провести расчет кинетики изменения бесконечного коэффициента размножения от энерговыработки;
- выявить зависимость нуклидного состава от энерговыработки;
- провести расчет энерговыделения и плотностей потоков быстрых и тепловых нейтронов по радиусу экспериментального канала

1 Особенности конструкций различных типов реактора и выбор основных элементов активной зоны

1.1 Уран-графитовые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем

В данном типе реакторов в качестве ядерного топлива используется как металлический уран, так и соединения урана с неделящимися компонентами (UO_2 , UC и тд.). В качестве замедлителя выступает графит. Данный вид реакторов привлек к себе внимание в силу известных достоинств жидкометаллических теплоносителей. Жидкометаллические теплоносители не имеют зависимости температуры от давления, которая наблюдается у воды. Благодаря этому можно создавать высокотемпературные контура теплоносителя при низких давлениях. Также отсутствуют явления подобные радиолизу воды. Малое давление насыщенных паров и высокая термическая и радиационная стойкость выгодно отличает их от других видов теплоносителей. ЖМТ обладают более высокой теплопроводностью чем вода, это дает лучший теплоотвод от поверхности твэл. Однако ЖМТ имеют ряд недостатков. Наиболее большим недостатком ЖМТ считается малая по сравнению с водой объемная теплоемкость, что ограничивает аккумуляцию тепла в нем. Некоторые жидкие щелочные металлы (особенно натрий) вступают в сильную реакцию с водой, из-за этого необходимо усложнить тепловую схему установки для обеспечения большей безопасности при эксплуатации. С экономической точки зрения основной недостаток жидких металлов (кроме ртути) – нахождение в твердом состоянии при комнатной температуре. Для решения этой проблемы необходимо вводить системы подогрева для плавления металлов, что усложняет конструкцию и делает более дорогостоящим эксплуатацию данной ЯЭУ.

1.2 Конструкционные особенности уран-графитовых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем

Активная зона реактора состоит из ячеек или модулей шестигранной, или квадратной формы. Ячейка реактора состоит из графитового замедлителя и центральной трубки рабочего канала. Внутри трубки располагается сборка тепловыделяющих элементов. Каждая сборка состоит из некоторого числа тепловыделяющих элементов стержневого типа. Тепловыделяющий элемент состоит из топливных блоков металлического или другого типа топлива. Стержень ядерного горючего покрыт защитной оболочкой из нержавеющей стали. Хороший тепловой контакт между сердечником и оболочкой достигается путем заполнения зазора жидким натрием. Ячейки (модули) шестигранной или квадратной формы представляют собой графитовые призмы, заключенные в герметизированные циркониевые оболочки для предотвращения попадания теплоносителя в графит. Между ячейками (модулями) имеется зазор через который пропускается теплоноситель с целью снятия тепла от графита.

2 Нейтронно-физический расчет реактора типа УГР

2.1 Предварительный тепловой расчет

Для выполнения предварительного расчета необходимо воспользоваться рабочими параметрами УГР, которые представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Выбранные рабочие параметры

Элемент	Значение
Толщина оболочки твэла, см	0,085
Диаметр твэла, см	1,350
Диаметр топливной таблетки, см	1,152
Диаметр отверстия в топливе, см	0,240
Число твэлов в кассете, шт	18,000
Размер кассеты «под ключ», см	25,000
Зазор между кассетами, см	16,200
Внешний диаметр канала, см	8,800
Внутренний диаметр канала, см	8,400

Схема расчета реакторов на тепловых нейтронах начинается с предварительной оценки размеров активной зоны, которые обеспечивали бы нужный теплосъем при заданной мощности аппарата.

Исходя из требуемой мощности реактора, размеры активной зоны можно оценить следующим образом:

$$V_{A3} = \frac{N}{N_0} \eta, \text{ см}^3; \quad (2.1)$$

$$D_{A3} = \sqrt[3]{\frac{4V_{A3}}{\pi m}}, \text{ см}; \quad (2.2)$$

$$H_{A3} = mD_{A3}, \text{ см}, \quad (2.3)$$

где V_{A3}, D_{A3}, H_{A3} – объем, диаметр и высота активной зоны;

m – отношение высоты к диаметру;

N – заданная тепловая мощность реактора, МВт;

η – коэффициент, учитывающий увеличение объема реактора.

Вследствие размещения регулирующих стержней СУЗ максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0_{\max}} = \overline{N_0} \cdot K_v, \text{ Вт/см}^3, \quad (2.4)$$

где K_v – объемный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов;

$\overline{N_0}$ – средняя удельная объемная нагрузка, Вт/см³.

Максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\max} = \frac{N_{0_{\max}} \cdot S_{\text{яч}}}{116 \cdot P_0}, \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (2.5)$$

где P_0 – периметр тепловыделяющей поверхности одного ТВЭла, см;

$S_{\text{яч}}$ – площадь сечения элементарной ячейки, см².

Необходимая для отвода тепла скорость определяются в максимально напряженном тепловыделяющем элементе из следующего выражения:

$$v = \frac{q_{\max} \cdot P_0 \cdot H_{\text{Аз}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{ТН}}}, \text{ м/с}, \quad (2.6)$$

где v – скорость прокачки теплоносителя;

K_z – осевой коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов, см²;

$S_{\text{ТН}}$ – площадь сечения прохода теплоносителя, приходящаяся на тепловыделяющую сборку, см²;

ρ – плотность теплоносителя при рабочих параметрах, г/см³;

Δi – разность теплосодержания теплоносителя на входе и выходе, ккал/кг.

Данная величина определяется по следующей формуле:

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \text{ ккал/кг}, \quad (2.7)$$

где C_p – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, ккал/(кг·градус);

$t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на входе и выходе, °С.

Таблица 2.2 – Выбранные расчетные параметры

Параметры	
Заданная тепловая мощность, МВт	180
Среднеинтегральное значение мощности, Вт/см ³	9
Коэффициент увеличения активной зоны	1,20
Отношение высоты к диаметру	0,95
Объемный коэффициент неравномерности	2,50
Осевой коэффициент неравномерности	1,35

Объем активной зоны:

$$V_{\text{АЗ}} = \frac{N}{N_0} \eta = \frac{180 \cdot 10^6}{9} \cdot 1,2 = 24 \cdot 10^6 \text{ см}^3.$$

Диаметр активной зоны:

$$D_{\text{АЗ}} = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{АЗ}}}{\pi t}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 24 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,95}} = 318,08 \text{ см.}$$

Высота активной зоны:

$$H_{\text{АЗ}} = m D_{\text{АЗ}} = 0,95 \cdot 318,08 = 302,18 \text{ см.}$$

Максимальная удельная объемная нагрузка активной зоны:

$$N_{0\text{max}} = \overline{N_0} \cdot K_v = 9 \cdot 2,5 = 22,5 \text{ Вт/см}^3.$$

Для определения максимально допустимой тепловой нагрузки необходимо вычислить периметр всех тепловыделяющих элементов в канале и площадь элементарной ячейки.

Периметр тепловыделяющих элементов:

$$P_0 = \pi \cdot d \cdot n = 3,14 \cdot 1,35 \cdot 18 = 76,3 \text{ см.}$$

Площадь элементарной ячейки имеет форму квадрата и находится по следующей формуле:

$$S_{\text{яч}} = a^2 = 25^2 = 625 \text{ см}^2.$$

Тогда, максимально допустимая тепловая нагрузка:

$$q_{\text{max}} = \frac{N_{0\text{max}} \cdot S_{\text{яч}}}{116 \cdot P_0} = \frac{22,5 \cdot 625}{116 \cdot 76,3} = 1,59 \text{ Гкал/м}^2 \cdot \text{ч}.$$

Для определения скорости прокачки теплоносителя необходимо вычислить площадь, приходящуюся на теплоноситель и разность теплосодержания теплоносителя на выходе.

Площадь канала:

$$S_{\text{кан}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 8,8^2}{4} = 60,79 \text{ см}^2.$$

Площадь, приходящаяся на твэлы:

$$S_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot n = \frac{3,14 \cdot 1,35^2}{4} \cdot 18 = 25,76 \text{ см}^2.$$

Площадь теплоносителя:

$$S_{\text{ТН}} = S_{\text{кан}} - S_{\text{ТВЭЛ}} = 29,65 \text{ см}^2. \quad :$$

$$\Delta i = C_p (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = 1,328 \cdot (520 - 300) = 292,16 \text{ ккал/кг}.$$

Тогда скорость прокачки теплоносителя:

$$v = \frac{q_{\text{max}} \cdot P_0 \cdot H_{\text{АЭ}}}{3,6 \cdot K_z \cdot \rho \cdot \Delta i \cdot S_{\text{ТН}}} = \frac{1,59 \cdot 76,3 \cdot 302,18}{3,6 \cdot 1,35 \cdot 0,897 \cdot 292,16 \cdot 29,65} = 0,93 \text{ м/с}.$$

Таким образом, получившееся скорость прокачки теплоносителя удовлетворяет указанным требованиям ($v < 10 \text{ м/с}$).

Все полученные результаты в ходе проведения предварительного расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты предварительного расчета

Параметр	Значение
Объем АЗ, см ³	24·10 ⁶
Диаметр АЗ, см	318,08
Высота АЗ, см	302,18
Максимальная удельная объемная нагрузка, Вт/см ³	22,50
Максимально допустимая тепловая нагрузка, Гкал/м ² ·ч	1,59
Скорость прокачки ТН, м/с	0,93

Принятые в предварительном расчете, шаг решетки, размеры канала, твэла, скорость теплоносителя, площадь сечения теплоносителя уточняются в результате последующего физического расчета.

2.2 Физический расчет реактора

Реальная ячейка, содержащая замедлитель, сборку твэл, теплоноситель, оболочку канала, заменяется эквивалентной-двузонной в которой имеется гомогенизированный блок замедлителя и фиктивный блок, образованный путем гомогенизации всего содержимого канала (ядерное горючее, конструкционные материалы, теплоноситель). На рисунке 2.1 представлены способ приведения многозонной ячейки к двузонной.

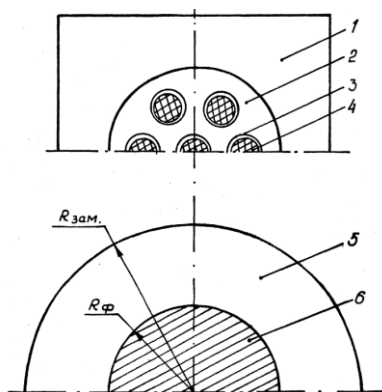


Рисунок 2.1 – Способ приведения многозонной ячейки к двузонной:

1–замедлитель; 2 – теплоноситель; 3– оболочка твэл; 4–твэл; 5– блок замедлителя; 5– фиктивный блок

Необходимо определить площади, занимаемые компонентами для дальнейшего вычисления бесконечного коэффициента размножения:

$$S_{\phi} = \pi \cdot \frac{D_{\text{кан}}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{8,8^2}{4} = 60,82 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{зам}} = S_{\text{яч}} - S_{\phi} = 625 - 60,82 = 564,18 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{ТВЭЛ}} = \pi \cdot \frac{D_{\text{ТВЭЛ}}^2}{4} \cdot n = 3,14 \cdot \frac{1,35^2}{4} \cdot 18 = 25,76 \text{ см}^2;$$

$$S_{\text{топ}} = \pi \cdot (R_{\text{топ}}^2 - R_{\text{отв}}^2) \cdot n = 3,14 \cdot (0,576^2 - 0,12^2) \cdot 18 = 17,95 \text{ см}^2;$$

$$\begin{aligned} S_{\text{КМ}} &= \pi \cdot (R_{\text{внеш.ТВЭЛ}}^2 - R_{\text{вн.ТВЭЛ}}^2 + R_{\text{внеш.кан}}^2 - R_{\text{вн.кан}}^2) \cdot n = \\ &= 3,14 \cdot (0,675^2 - 0,59^2 + 4,4^2 - 4,2^2) \cdot 18 = 11,48 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Весь перечень гомогенизированных констант представлен в приложении Б.

2.3 Ядерно-физические характеристики «холодного» реактора

Необходимо рассчитать нейтронно-физические характеристики (сечения взаимодействия, замедляющие свойства) для каждой зоны (топливо, оболочка, теплоноситель, замедлитель), т.к. каждая из них состоит из материалов с разными свойствами взаимодействия с нейтронами. Температура всех элементов реактора принимается 20 °С.

Ядерная концентрация для каждого элемента находится по формуле:

$$N = \frac{N_A \cdot \rho}{A}, \text{ молекул/см}^3, \quad (2.8)$$

где N_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹;

ρ – весовая концентрация элемента, г/см³;

A – атомный вес элемента, г/моль.

Вычисление ядерных концентраций производится для каждого элемента активной зоны и отражателя. Результаты расчета представлены в приложении А. Ниже представлен расчет концентрации ядерного топлива:

концентрация UC:

$$N_{UC} = \frac{N_A \cdot \rho_{UC}}{A_{UC}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 13,63}{250} = 3,28 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

концентрация U²³⁵:

$$N_{U^{235}} = N_{UC} \cdot \omega = 3,28 \cdot 10^{22} \cdot 0,035 = 1,15 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3},$$

где ω – обогащение по U²³⁵.

концентрация U²³⁸:

$$N_{U^{238}} = N_{UC} \cdot (1 - \omega) = 3,28 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,035) = 3,17 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

концентрация C:

$$N_C = N_{UC} = 3,28 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}.$$

Для определения сечений деления и поглощения, отнесенных к средней скорости тепловых нейтронов, пользуются формулами:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_{f_0} \cdot 0,884 \cdot f_f \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}; \quad (2.9)$$

$$\bar{\sigma}_a = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г}}}, \quad (2.10)$$

где σ_a, σ_f – табличные значения сечений, барн;

f_a, f_f – поправочный коэффициент f , учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$;

$T_{н.г}$ – температура нейтронного газа.

Температура нейтронного газа принята равной $T_{н.г} = 400$ К. При таком значении температуры, поправочный коэффициент равен $f_f = 0,96$ и $f_a = 0,96$ для делящихся нуклидов и $f_a = 1$ для неделящихся нуклидов.

Макроскопические сечения вычисляются по формуле:

$$\Sigma_i = N_i \cdot \sigma_i, \text{ см}^{-1}. \quad (2.11)$$

Ниже представлен расчет микроскопических и макроскопических сечений для топлива. Остальные результаты приведены в приложении А.

Микросечения для U^{235} :

$$\sigma_a^{U^{235}} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 496,07 \text{ барн};$$

$$\sigma_f^{U^{235}} = 582 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 422,71 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{235}} = 15 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{235}} = \sigma_a^{U^{235}} + \sigma_s^{U^{235}} (1 - \mu_s) = 496,07 + 15(1 - 0) = 511,07 \text{ барн}.$$

Микросечения для U^{238} :

$$\sigma_a^{U^{238}} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 1,96 \text{ барн};$$

$$\sigma_s^{U^{238}} = 9 \text{ барн};$$

$$\sigma_{tr}^{U^{238}} = \sigma_a^{U^{238}} + \sigma_s^{U^{238}} (1 - \mu_s) = 1,96 + 9(1 - 0) = 10,96 \text{ барн.}$$

Микросечения для С:

$$\sigma_a^C = 0,004 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{400}} = 0,003 \text{ барн;}$$

$$\sigma_s^C = 4,7 \text{ барн;}$$

$$\sigma_{tr}^C = \sigma_a^C + \sigma_s^C (1 - \mu_s) = 0,004 + 4,7(1 - 0,06) = 4,42 \text{ барн.}$$

Макросечения для U^{235} :

$$\Sigma_f^{U^{235}} = 422,71 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,486 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_a^{U^{235}} = 496,07 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,57 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{235}} = 15 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,0172 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{235}} = 511,07 \cdot 10^{-24} \cdot 1,15 \cdot 10^{21} = 0,587 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для U^{238} :

$$\Sigma_a^{U^{238}} = 1,96 \cdot 10^{-24} \cdot 3,17 \cdot 10^{22} = 0,0623 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{U^{238}} = 9 \cdot 10^{-24} \cdot 3,17 \cdot 10^{22} = 0,285 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{U^{238}} = 10,96 \cdot 10^{-24} \cdot 3,17 \cdot 10^{22} = 0,347 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для С:

$$\Sigma_a^C = 0,003 \cdot 10^{-24} \cdot 3,284 \cdot 10^{22} = 9,94 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^C = 4,7 \cdot 10^{-24} \cdot 3,284 \cdot 10^{22} = 0,154 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^C = 4,42 \cdot 10^{-24} \cdot 3,284 \cdot 10^{22} = 0,145 \text{ см}^{-1}.$$

Макросечения для UC:

$$\Sigma_a^{UO_2} = \Sigma_a^{U^{235}} + \Sigma_a^{U^{238}} + \Sigma_a^C = 0,632 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_f^{UC} = \Sigma_f^{U^{235}} = 0,486 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_s^{UC} = \Sigma_s^{U^{235}} + \Sigma_s^{U^{238}} + \Sigma_s^C = 0,456 \text{ см}^{-1};$$

$$\Sigma_{tr}^{UC} = \Sigma_{tr}^{U^{235}} + \Sigma_{tr}^{U^{238}} + \Sigma_{tr}^C = 1,079 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность находятся по формулам, представленным ниже:

$$\xi = \frac{2}{A + \frac{2}{3}}; \quad (2.12)$$

$$\xi \Sigma_s = \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \cdot \Sigma_s, \text{ см}^{-1}. \quad (2.13)$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{235} :

$$\xi^{U^{235}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 8,49 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{235}} = 8,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0172 = 1,46 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для U^{238} :

$$\xi^{U^{238}} = \frac{2}{238 + \frac{2}{3}} = 8,38 \cdot 10^{-3};$$

$$\xi \Sigma_s^{U^{238}} = 8,38 \cdot 10^{-3} \cdot 0,285 = 0,0024 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для C:

$$\xi^C = \frac{2}{12 + \frac{2}{3}} = 0,158;$$

$$\xi \Sigma_s^C = 0,158 \cdot 0,154 = 0,024 \text{ см}^{-1}.$$

Логарифмический декремент замедления и замедляющая способность для UC:

$$\xi^{UC} = \frac{\sum \xi \Sigma}{\sum \Sigma} = \frac{\xi \Sigma^{U^{235}} + \xi \Sigma^{U^{238}} + \xi \Sigma^C}{\Sigma^{U^{235}} + \Sigma^{U^{238}} + \Sigma^C} = 0,059;$$

2.4 Расчет бесконечного коэффициента размножения

Коэффициент размножения для бесконечной среды определяется формулой четырех сомножителей:

$$k_{\infty} = \varphi \cdot \mu \cdot \theta \cdot \eta, \quad (2.14)$$

где φ – вероятность избежать резонансного захвата;
 μ – коэффициент размножения на быстрых нейтронах;
 θ – коэффициент использования тепловых нейтронов;
 η – число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе.

2.4.1 Вероятность избежать резонансного захвата

Резонансный захват нейтронов происходит ядрами U^{238} . Вероятность избежать нейтронами резонансного захвата рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{k_T \cdot R_{UC} \cdot \sqrt{R_{ТВЭЛ} \cdot n \cdot \varepsilon} + 0,73 \cdot n \cdot R_{UC}^2 \cdot \varepsilon}{\xi \Sigma_{s_{зам}} \cdot S_{зам} + \xi \Sigma_{s_{\Phi}} \cdot S_{\Phi}}\right), \quad (2.15)$$

где k_T – температурный коэффициент;
 ε – пористость по U^{238} .

Температурный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot \sqrt{T_U}), \quad (2.16)$$

где T_U – температура топлива.

Пористость по U^{238} определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{N^{U^{238}}}{N_0^{U^{238}}}, \quad (2.17)$$

где $N_0^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в природном уране;
 $N^{U^{238}}$ – концентрация U^{238} в топливе.

Температурный коэффициент:

$$k_T = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 0,001 \cdot \sqrt{400}) = 1,04625.$$

Пористость по U^{238} :

$$\varepsilon = \frac{3,17 \cdot 10^{22} \cdot 238}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,993 \cdot 18,7} = 0,674.$$

Тогда вероятность избежать резонансного захвата:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{1,04625 \cdot 0,576 \cdot \sqrt{0,675 \cdot 18 \cdot 0,674} + 0,73 \cdot 18 \cdot 0,576^2 \cdot 0,674}{0,0614 \cdot 564,18 + 0,0153 \cdot 60,82}\right) = 0,8771.$$

2.4.2 Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

Величина μ в гетерогенном реакторе зависит от формы, размеров и расположения топливного блока, а также от диффузионных свойств топливного блока. При расчете μ для стержневых ТВЭЛ можно воспользоваться формулой:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot P}{1 - 0,52 \cdot P}, \quad (2.18)$$

где P – вероятность того, что быстрый нейтрон испытывает какое-либо столкновение с ядром U^{238} .

Значение P определяется по рисунку 2.2:

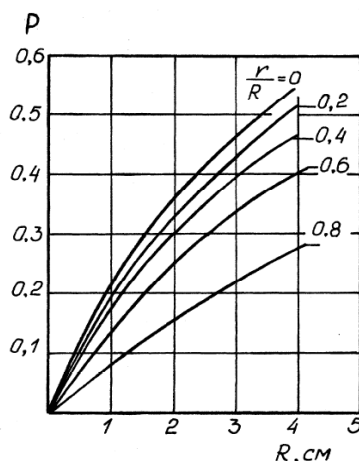


Рисунок 2.2 – График вероятности столкновения быстрого нейтрона с ядром U^{238}

При соотношении $\frac{r}{R} = 0,2$ и радиусе топлива 0,576 см, величина $P=0,1$.

Тогда коэффициент размножения на быстрых нейтронах:

$$\mu = 1 + \frac{0,092 \cdot 0,1}{1 - 0,52 \cdot 0,1} = 1,0097.$$

2.4.3 Коэффициент использования тепловых нейтронов

Расчет θ пройдет в два этапа. Сначала определяется величина θ'_ϕ это отношение числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке, к общему числу поглощенных тепловых нейтронов. Затем определяется θ_0 это коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{\text{топ}}}}{\Sigma_{a_\phi}}. \quad (2.19)$$

Величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке определяется по формуле:

$$\frac{1}{\theta'_\phi} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_{a_{\text{зам}}}}{S_\phi \cdot \Sigma_{a_\phi}} + (E - 1), \quad (2.20)$$

где F – коэффициент экранирования;

$(E - 1)$ – фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе.

Для цилиндрического уранового стержня коэффициент экранирования равен:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_\phi}{L_\phi} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}{I_1\left(\frac{R_\phi}{L_\phi}\right)}, \quad (2.21)$$

где I_0 и I_1 – модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядков;

L_ϕ – длина диффузии в фиктивном блоке.

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{\text{зам}}}{L_{\Phi}} - 0,75 \right). \quad (2.22)$$

Длина диффузии определяется по формуле:

$$L_{\text{диф}} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr} \cdot \Sigma_a}}. \quad (2.23)$$

Тогда длина диффузии в фиктивном блоке и блоке замедлителя:

$$L_{\Phi} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr\Phi} \cdot \Sigma_{a\Phi}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,543 \cdot 0,229}} = 1,64 \text{ см};$$

$$L_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{1}{3\Sigma_{tr\Phi} \cdot \Sigma_{a\Phi}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,366 \cdot 2,4 \cdot 10^{-4}}} = 61,545 \text{ см}.$$

Фактор, учитывающий избыточное поглощение нейтронов в замедлителе:

$$(E-1) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{R_{\text{зам}}}{L_{\text{зам}}} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{R_{\text{зам}}}{L_{\Phi}} - 0,75 \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{14,1}{61,545} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{14,1}{1,64} - 0,75 \right) = 0,0368.$$

Коэффициент экранирования:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\Phi}}{L_{\Phi}} \cdot \frac{I_0\left(\frac{R_{\Phi}}{L_{\Phi}}\right)}{I_1\left(\frac{R_{\Phi}}{L_{\Phi}}\right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4,4}{1,64} \cdot \frac{I_0\left(\frac{4,4}{1,64}\right)}{I_1\left(\frac{4,4}{1,64}\right)} = 1,71.$$

Тогда величина отношения числа тепловых нейтронов, поглощенных в фиктивном блоке:

$$\frac{1}{\theta'_{\Phi}} = 1 + F \cdot \frac{S_{\text{зам}} \cdot \Sigma_{a\text{зам}}}{S_{\Phi} \cdot \Sigma_{a\Phi}} + (E-1) = 1 + 1,71 \cdot \frac{564,18 \cdot 0,00024}{60,82 \cdot 0,229} + 0,0368;$$

$$\theta'_{\Phi} = 0,949.$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов внутри фиктивного блока:

$$\theta_0 = \frac{\Sigma_{a_{\text{топ}}}}{\Sigma_{a_{\text{ф}}}} = \frac{0,187}{0,229} = 0,816.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов:

$$\theta = \theta_0 \cdot \theta'_{\text{ф}} = 0,816 \cdot 0,949 = 0,774.$$

2.4.4 Число вторичных нейтронов на один поглощенный в топливе

η показывает число вторичных нейтронов, приходящихся на один тепловой нейтрон, поглощенный топливом и вызвавший деление. Рассчитывается по формуле:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_{f_{\text{топ}}}}{\Sigma_{a_{\text{топ}}}}, \quad (2.24)$$

где ν_f – число нейтронов, которое испускается при акте деления.

Тогда:

$$\eta = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_{f_{\text{топ}}}}{\Sigma_{a_{\text{топ}}}} = 2,42 \cdot \frac{0,486}{0,632} = 1,86.$$

Тогда коэффициент размножения в бесконечной среде:

$$k_{\infty} = \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \eta = 1,0097 \cdot 0,87716 \cdot 0,774 \cdot 1,86 = 1,27.$$

2.5 Расчет эффективного коэффициента размножения

Эффективный коэффициент размножения нейтронов находится по формуле:

$$k_{\text{эфф}} = k_{\infty} \cdot P = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2}, \quad (2.25)$$

где B^2 – геометрический параметр;

τ_p – возраст нейтронов;

P – вероятность избежать утечки.

Квадрат длины диффузии отражателя с учетом гетерогенности:

$$L_p^2 = L_{\text{зам}}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_{\Phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{\text{яч}}}{\left(1 + \frac{S_{\Phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^{\Phi}}{\Sigma_{tr}^{\text{зам}}}\right) \cdot S_{\text{зам}}} \cdot (1 - \theta'_{\Phi}). \quad (2.26)$$

Возраст нейтронов с учётом всех элементов ячейки:

$$\tau_p = \tau_{\text{зам}} \left(\frac{S_{\text{яч}}}{S_{\text{зам}}} \right)^2. \quad (2.27)$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2, \quad (2.28)$$

где δ – эффективная добавка за счет отражателя.

Эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{\text{отр}} \cdot th \frac{T}{L_{\text{отр}}}, \quad (2.29)$$

где T – толщина отражателя.

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M, \quad (2.30)$$

где M – длина миграции нейтронов в отражателе.

Длина миграции:

$$M = \sqrt{L^2 + \tau_p}. \quad (2.31)$$

Тогда квадрат длины диффузии отражателя:

$$\begin{aligned} L_p^2 &= L_{\text{зам}}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_{\Phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{1}{F}\right) \cdot S_{\text{яч}}}{\left(1 + \frac{S_{\Phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^{\Phi}}{\Sigma_{tr}^{\text{зам}}}\right) \cdot S_{\text{зам}}} \cdot (1 - \theta'_{\Phi}) = \\ &= 61,54^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{1}{1,71}\right) \cdot 625}{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{0,543}{0,366}\right) \cdot 564,18} \cdot (1 - 0,949) = 195 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Возраст нейтронов:

$$\tau_p = \tau_{\text{зам}} \left(\frac{S_{\text{яч}}}{S_{\text{зам}}} \right)^2 = 352 \cdot \left(\frac{625}{564,18} \right)^2 = 431,98 \text{ см}^2.$$

Длина миграции:

$$M = \sqrt{195 + 431,98} = 25,05 \text{ см.}$$

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M = 1,5 \cdot 24,96 = 37,57 \text{ см.}$$

Тогда эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{\text{отр}} \cdot th \frac{T}{L_{\text{отр}}} = 1,2 \cdot 13,98 \cdot th \frac{37,57}{13,98} = 16,6 \text{ см.}$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2 \cdot \delta} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{R + \delta} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{302,18 + 2 \cdot 16,6} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{159,04 + 16,6} \right)^2 = 2,75 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}.$$

Тогда эффективный коэффициент размножения:

$$k_{\text{эфф}} = k_{\infty} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau_p)}{1 + B^2 L_p^2} = 1,27 \cdot \frac{\exp(-2,75 \cdot 10^{-4} \cdot 431,98)}{1 + 2,75 \cdot 10^{-4} \cdot 195} = 1,0737.$$

2.6 Оптимизация

Оптимизация заключается в подборе размера ячейки $H_{яч}$, радиуса канала $R_{кан}$ и радиуса ТВЭЛ $R_{ТВЭЛ}$ с расчетом повышения значения бесконечного коэффициента размножения. А также подбора скорости теплоносителя, не превышающего 10 м/с.

Значения бесконечного коэффициента размножения и скорости течения теплоносителя при изменении размера ячейки представлены в таблице 2.4 и на рисунке 2.3.

Таблица 2.4 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения и скорости теплоносителя от размера ячейки

Размер ячейки, см	Бесконечный коэффициент размножения	Скорость теплоносителя, м/с
15	0,9889	0,3367
17	1,0992	0,4325
19	1,1725	0,5403
21	1,2215	0,6601
23	1,2539	0,7917
25	1,2743	0,9354
27	1,2858	1,0910
29	1,2907	1,2586
31	1,2901	1,4382
33	1,2852	1,6298
35	1,2768	1,8333
37	1,2656	2,0489
39	1,2519	2,2763
41	1,2361	2,5158

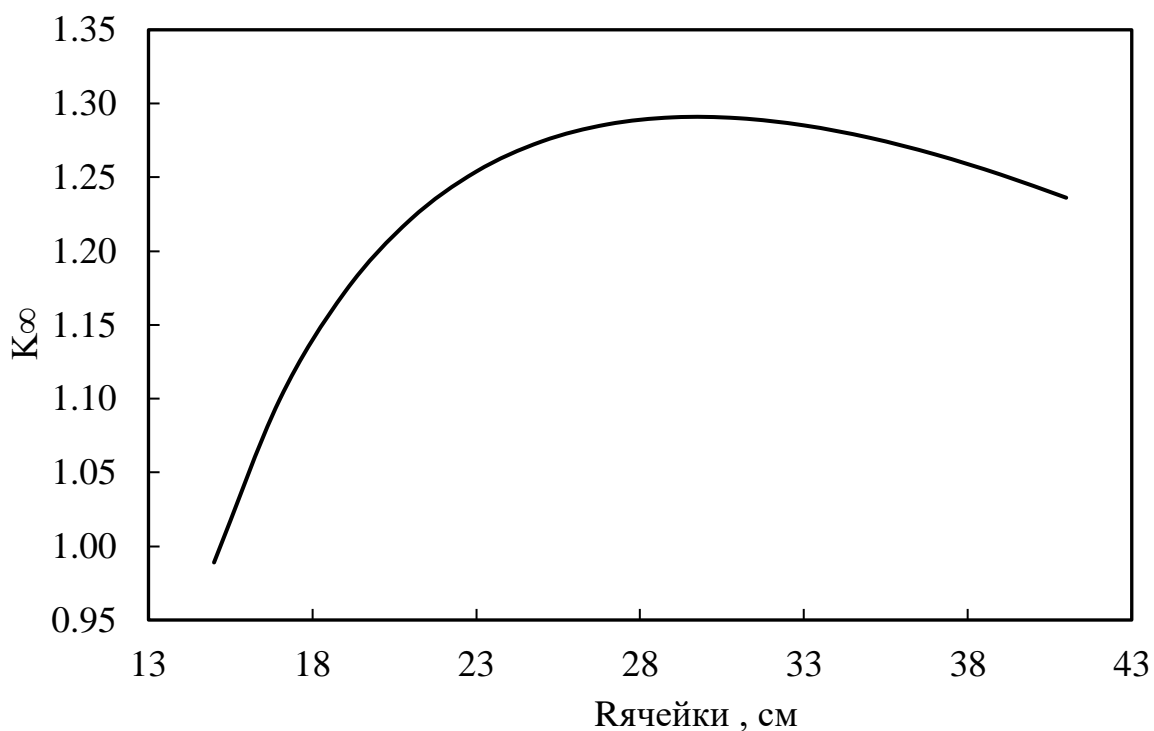


Рисунок 2.3 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения от размера ячейки

Из графика наибольшее значение бесконечного коэффициента размножения наблюдается при размере ячейки равном 29 см, при этом скорость прокачки теплоносителя составляет 1,2586 м/с а бесконечный коэффициент размножения 1,29.

Значения бесконечного коэффициента размножения и скорости течения теплоносителя при изменении размера топливной таблетки представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Зависимость бесконечного коэффициента размножения и скорости теплоносителя от размера топливной таблетки

Радиус топлива, см	Бесконечный коэффициент размножения	Скорость теплоносителя, м/с
0,4	0,9153	0,8353
0,5	1,2219	0,9384
0,6	1,2975	0,9453
0,7	1,2799	0,9443
0,8	1,1659	0,9325

На рисунке 2.4 представлена зависимость бесконечного коэффициента размножения от размера топливной таблетки.

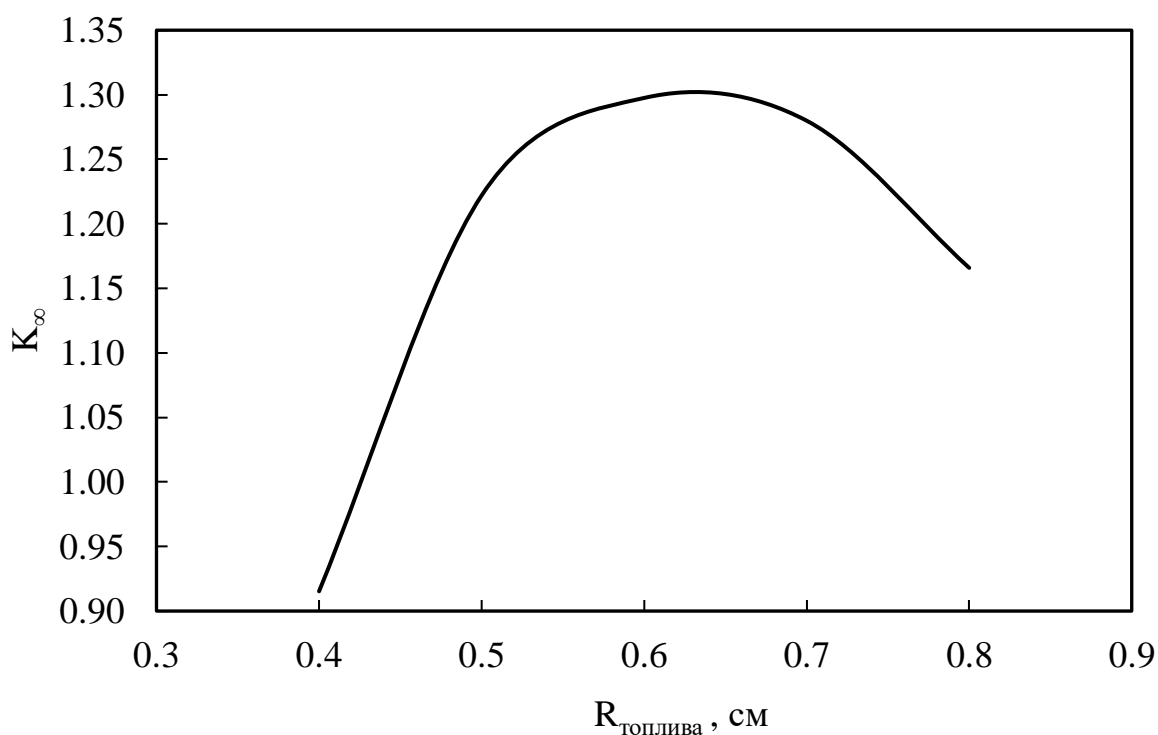


Рисунок 2.4– Зависимость бесконечного коэффициента размножения от размера топливной таблетки

Из графика наибольшее значение бесконечного коэффициента размножения наблюдается при радиусе топливной таблетки равном 0,6 см, при

этом скорость прокачки теплоносителя составляет 0,945 м/с а бесконечный коэффициент размножения 1,298.

2.7 Температурные эффекты реактивности

При работе реактора происходит существенное повышение температуры всех материалов активной зоны, отражателя и корпуса реактора.

При повышении температуры повышается температура нейтронного газа, что приводит к уменьшению сечений поглощения и деления тепловых нейтронов. Повышение температуры приводит к уменьшению плотности материалов вследствие расширения, что ведет к уменьшению числа ядер в единице объема и, следовательно, к уменьшению макросечений. Повышение $T_{н.г.}$ вызывает смещение энергии «сшивки» спектров тепловых и замедляющихся нейтронов в область больших энергий. Сдвиг энергии «сшивки» приводит к уменьшению возраста тепловых нейтронов.

Повышение температуры ядерного горючего приводит к уширению резонансов горючего вследствие их теплового движения.

Все это приводит к изменению реактивности реактора.

2.7.1 Зависимость поперечных сечений от температуры

Чтобы определить температурные эффекты реактивности, нужно знать температуру нейтронного газа при рабочей температуре и соответствующие ей новые значения сечений и других параметров реактора.

При расчете можно принимать, что средняя температура замедлителя равна средней температуре теплоносителя. Эффективная температура нейтронного газа вычисляется по формуле:

$$T_{\text{н.г.}} = T_{\text{зам}} \left(1 + 1,4 \frac{\sum a_{\text{яч}}}{\xi \sum_{s_{\text{яч}}} S_{\text{яч}}} \right) \text{ К}, \quad (2.32)$$

где $T_{\text{зам}} = \frac{T_{\text{вых}} + T_{\text{вх}}}{2} = \frac{792,15 + 573,15}{2} = 683,15 \text{ К}.$

Сечения берутся при температуре замедлителя. Замедляющая способность определяется простым усреднением, однако, при расчете макросечения поглощения ячейки необходимо учитывать блокэффект.

$$\xi \sum_{s_{\text{яч}}} S_{\text{яч}} = \frac{\xi \sum_{s_{\text{зам}}} S_{\text{зам}} + \xi \sum_{s_{\text{топл}}} S_{\text{топл}} + \xi \sum_{s_{\text{тн}}} S_{\text{тн}} + \xi \sum_{s_{\text{км}}} S_{\text{км}}}{S_{\text{яч}}} = 0,0569 \text{ см}^{-1},$$

$$\sum_{a_{\text{яч}}} = \frac{\sum_{a_{\text{зам}}} S_{\text{зам}} + \frac{1}{F} (\sum_{a_{\text{топл}}} S_{\text{топл}} + \sum_{a_{\text{тн}}} S_{\text{тн}} + \sum_{a_{\text{км}}} S_{\text{км}})}{S_{\text{зам}} + \frac{1}{F} (S_{\text{топл}} + S_{\text{тн}} + S_{\text{км}})} = 0,01067 \text{ см}^{-1},$$

$$\frac{\sum_{a_{\text{яч}}}}{\xi \sum_{s_{\text{яч}}} S_{\text{яч}}} = 0,187.$$

Отсюда следует, что температура нейтронного газа при рабочей температуре равна:

$$T_{\text{н.г.}} = T_{\text{зам}} \left(1 + 1,4 \frac{\sum_{a_{\text{яч}}}}{\xi \sum_{s_{\text{яч}}} S_{\text{яч}}} \right) = 683,15 \left(1 + 1,4 \frac{0,01067}{0,0569} \right) = 862 \text{ К}.$$

Сечения при температуре нейтронного газа определяются следующим образом:

$$\bar{\sigma}_a(T_{\text{н.г.}}) = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot f_a \cdot F(\chi_{\text{гр}}) \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{\text{н.г.}}}}. \quad (2.33)$$

где σ_a – микроскопическое сечение поглощения стандартных нейтронов;
 f_a – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение сечения поглощения и деления от закона $1/v^2$;

$T_{\text{н.г.}}$ – температура нейтронного газа;

$$\frac{\Sigma_{a_{яч}}}{\xi \Sigma_{s_{яч}}} = \frac{\chi_{гр}^2 \cdot e^{-\chi_{гр}}}{1 - (1 + \chi_{гр}) \cdot e^{-\chi_{гр}}} = f(\chi_{гр}), \quad (2.34)$$

где $\chi_{гр}$ – верхняя граница тепловой группы;

$\chi_{гр}$ – определяется из вышеназванного уравнения подбором.

Подбор был осуществлен с помощью MS Excel и полученное значение $\chi_{гр}$ приблизительно равно 8,36. Коэффициенты $f_a(T_{н.г.})$, $F(\chi_{гр})$ находятся по значению $\chi_{гр}$ из графиков на рисунке 2.5.

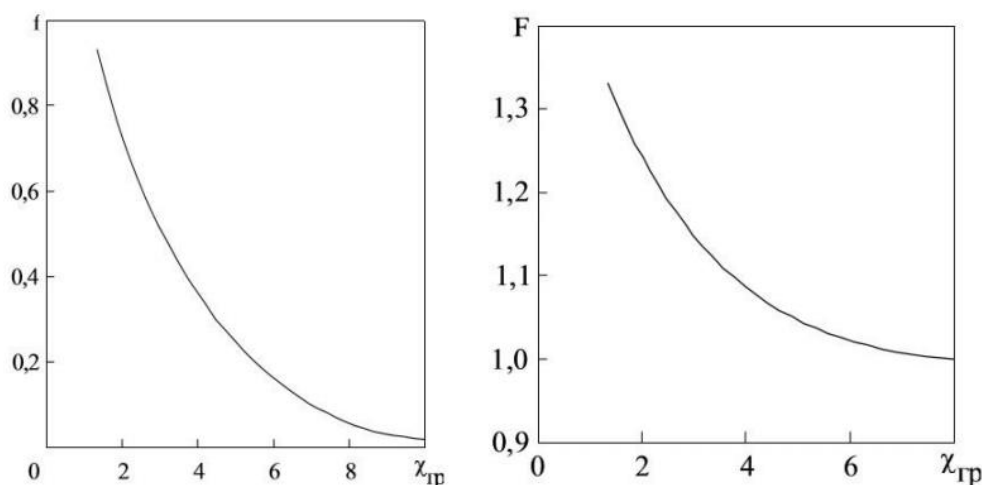


Рисунок 2.5 – зависимость коэффициентов $f(\chi_{гр})$, $F(\chi_{гр})$ от $\chi_{гр}$

Примем значения $f(\chi_{гр}) = 0,05$ $F(\chi_{гр}) = 1$. Тогда формула для пересчета сечений примет следующий вид:

$$\bar{\sigma}_a(T_{н.г.}) = \sigma_{a_0} \cdot 0,884 \cdot 0,932 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{н.г.}}}. \quad (2.35)$$

Сечения деления пересчитываются аналогичным образом. Значения микроскопических и макроскопических сечений при рабочей температуре приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. – микроскопические и макроскопические сечения поглощения и деления при рабочей температуре

Вид сечения	σ_f , барн	σ_a , барн	Σ_f , см ⁻¹	Σ_a , см ⁻¹
U ²³⁵	277,315	325,440	0,319	0,3738
U ²³⁸	0	1,291	0	0,0408
C(топл)	0	0,002	0	0,0001
Na	0	0,268	0	0,0059
Fe	0	1,293	0	0,0746
Cr	0	1,477	0	0,0241
Ni	0	2,192	0	0,0207
C(зам)	0	0,002	0	0,0002
Ti	0	2,965	0	0,0021
Mn	0	6,799	0	0,0117
C(сталь)	0	0,002	0	0

2.7.2 Расчет эффективного коэффициента размножения «горячего» реактора.

Эффективный коэффициент размножения для горячего реактора вычисляется следующим образом

$$k_{\text{эфф}}^{\text{гор}} = k_{\infty}^{\text{гор}} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau^{\text{гор}})}{1 + B^2 L_{\text{гор}}^2}, \quad (2.36)$$

$$\tau^{\text{гор}} = \tau^{\text{хол}} - \frac{1}{3 \cdot \xi \Sigma_{s_{\text{яч}}} \cdot \Sigma_{tr_{\text{яч}}}} \ln \frac{T_{\text{н.г.}}}{T_0} \text{ см}^2, \quad (2.37)$$

где $T_0 = 293 \text{ К}$.

$$\tau^{\text{гор}} = 415 \text{ см}^2.$$

Квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора, находящегося в рабочем состоянии, рассчитывается так же, как и для холодного реактора. Зависимость квадрата длины диффузии замедлителя от температуры можно вычислить по следующей формуле:

$$L_{\text{зам}}^2(T) = L_{\text{зам}}^2(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48} \text{ см}^2. \quad (2.38)$$

Опыт показывает, что целесообразно поддерживать температуру графитовой кладки в пределах 673 – 973 К. Примем температуру графитовой кладки $T = 698 \text{ К}$, тогда:

$$L_{\text{зам}}^2(T) = L_{\text{зам}}^2(T_0) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,48} = 61,54^2 \cdot \left(\frac{862}{293} \right)^{0,48} = 6470 \text{ см}^2.$$

Пересчитаем квадрат длины диффузии для решетки гетерогенного реактора:

$$\begin{aligned} L^2 &= L_{\text{зам}}^2 \cdot \frac{\left(1 + \frac{S_{\Phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{1}{F} \right) \cdot S_{\text{яч}}}{\left(1 + \frac{S_{\Phi}}{S_{\text{зам}}} \cdot \frac{\Sigma_{tr}^{\Phi}}{\Sigma_{tr}^{\text{зам}}} \right) \cdot S_{\text{зам}}} \cdot (1 - \theta'_{\Phi}) = \\ &= 6470 \cdot \frac{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{1}{1,02} \right) \cdot 625}{\left(1 + \frac{60,82}{564,18} \cdot \frac{0,150}{0,463} \right) \cdot 564,18} \cdot (1 - 0,986) = 93,5 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Длина миграции:

$$M = \sqrt{63,5 + 418} = 22,55 \text{ см}.$$

Толщина отражателя:

$$T = 1,5 \cdot M = 1,5 \cdot 21,94 = 33,82 \text{ см}.$$

Эффективная добавка за счет отражателя:

$$\delta = 1,2 \cdot L_{\text{отр}} \cdot th \frac{T}{L_{\text{отр}}} = 1,2 \cdot 9,67 \cdot th \frac{33,82}{9,6} = 11,6 \text{ см}.$$

Геометрический параметр:

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{302,18 + 2 \cdot 11,6} \right)^2 + \left(\frac{2,405}{159,04 + 11,6} \right)^2 = 2,92 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}.$$

Коэффициенты в формуле четырех сомножителей были пересчитаны средствами MS Excel и приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – коэффициенты формулы четырех сомножителей

Коэффициент	В «холодном» реакторе	В «горячем» реакторе	Изменение параметра
η	1,8600	1,8600	0
θ	0,7740	0,8030	0,0290
μ	1,0097	1,0097	0
φ	0,8772	0,8774	0,0002
k_{∞}	1,2714	1,3214	0,0500

Эффективный коэффициент размножения «горячего» реактора, с учетом вышеуказанных новых параметров, равен:

$$k_{\text{эфф}}^{\text{гор}} = k_{\infty}^{\text{гор}} \cdot \frac{\exp(-B^2 \tau^{\text{гор}})}{1 + B^2 L_{\text{гор}}^2} = 1,32 \cdot \frac{\exp(-2,92 \cdot 10^{-4} \cdot 415)}{1 + 2,92 \cdot 10^{-4} \cdot 93,5} = 1,137.$$

По сравнению с «холодным» состоянием реактора, эффективный коэффициент размножения увеличился на 0,0853, что свидетельствует о том, что ТЭР данного реактора положительный.

Определим температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = \frac{0,2424 - 0,2127}{862 - 400} = 0,0000646 \text{ К}^{-1}.$$

Температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \rho^{\text{гор}} - \rho^{\text{хол}} = 0,2424 - 0,2127 = 0,0298.$$

Наличие положительного температурного эффекта приводит к увеличению эффективного коэффициента размножения при нагреве реактора, что может навредить устойчивой работе реактора.

2.8 Расчет ядерного реактора с помощью программного обеспечения WIMS-D5

Для того, чтобы убедиться в правильности расчетов реактора было решено воспользоваться программным обеспечением WIMS-D5. Эта программа позволяет с большой точностью рассчитывать параметры ядерного реактора.

В настоящее время программа использует универсальную 69-групповую библиотеку констант, подготовленную на основе файлов оцененных нейтронных данных (ENDF, JEF, JENDL) в ГНЦ РФ ФЭИ.

Требуемая входная информация сравнительно невелика по объему. Входная информация вводится в достаточно простой форме и содержит описание рассматриваемого варианта, т.е. сведения о материалах и геометрии ячейки. Программа дает возможность пользователю выбирать на разных этапах расчета различные физические модели и методы решения.

2.8.1 Расчет «холодного» реактора

В приложении В представлен код, содержащий в себе входные данные, предоставляемые программе для расчета «холодного» реактора, такие как: количество групп нейтронов (в данном случае произведена свертка в 4 группы), оптимизированные радиусы зон материалов (поскольку в WIMS-е ячейка представляет собой слоистый цилиндр), температуры топлива, конструкционных материалов, теплоносителя и замедлителя, концентрации. За элементарную ячейку был принят экспериментальный канал.

В созданной расчетной модели элементарной ячейки реактора была рассчитана кинетика изменения K_{∞} в зависимости от глубины выгорания. Для этого была задана мощность реактора 30,1 МВт/т(U) и задан произвольный шаг расчета (по времени). Полученные результаты представлены в таблице 2.8. На основе этих результатов построен график зависимости реактивности от энерговыработки, который представлен на рисунке 2.6.

Таблица 2.8 – результаты расчета холодного реактора

t, сут	Q, МВт·сут/Т(У)	K_{∞}	ρ
1	30,2	1,1647	0,1414
2	60,4	1,1329	0,1173
3	90,6	1,1318	0,1165
6	181,2	1,1311	0,1159
9	271,8	1,1289	0,1142
12	362,4	1,1271	0,1128
18	543,6	1,1255	0,1115
24	724,8	1,1230	0,1095
30	906,0	1,1209	0,1079
36	1087,2	1,1193	0,1066
46	1389,2	1,1177	0,1053
56	1691,2	1,1151	0,1033
71	2144,2	1,1126	0,1012
90	2718,0	1,1087	0,0981
109	3291,8	1,1036	0,0939
159	4801,8	1,0984	0,0896
209	6311,8	1,0844	0,0779
259	7821,8	1,0707	0,0659
309	9331,8	1,0570	0,0539
359	10841,8	1,0435	0,0417
409	12351,8	1,0302	0,0293
459	13861,8	1,0169	0,0167
509	15371,8	1,0037	0,0037

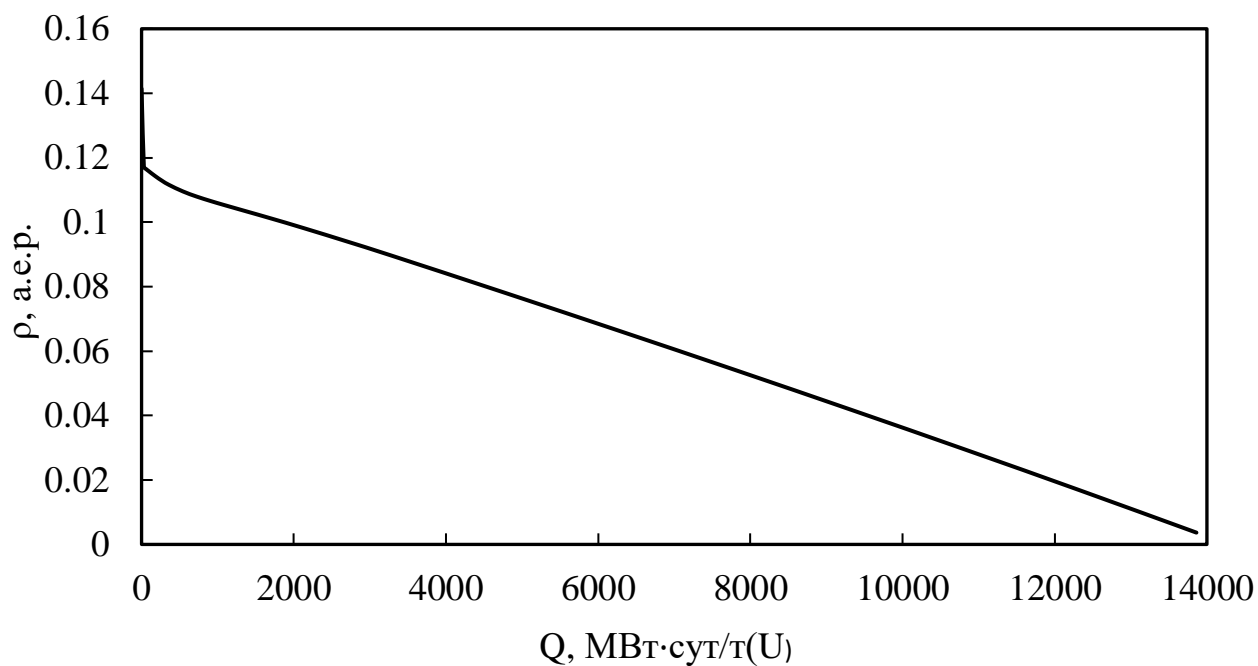


Рисунок 2.6 – график зависимости реактивности от энерговыработки

Из рисунка 2.6 видно, что после одних суток с момента работы реактора реактивность резко падает из-за отравления ксеноном. Таким образом потеря реактивности на отравление ксеноном составляет 0,0241 абсолют. ед. реактивности.

Далее были построены графики изменения нуклидного состава ядерного топлива от энерговыработки, которые представлены на рисунках 2.7, 2.8 и 2.9 соответственно.

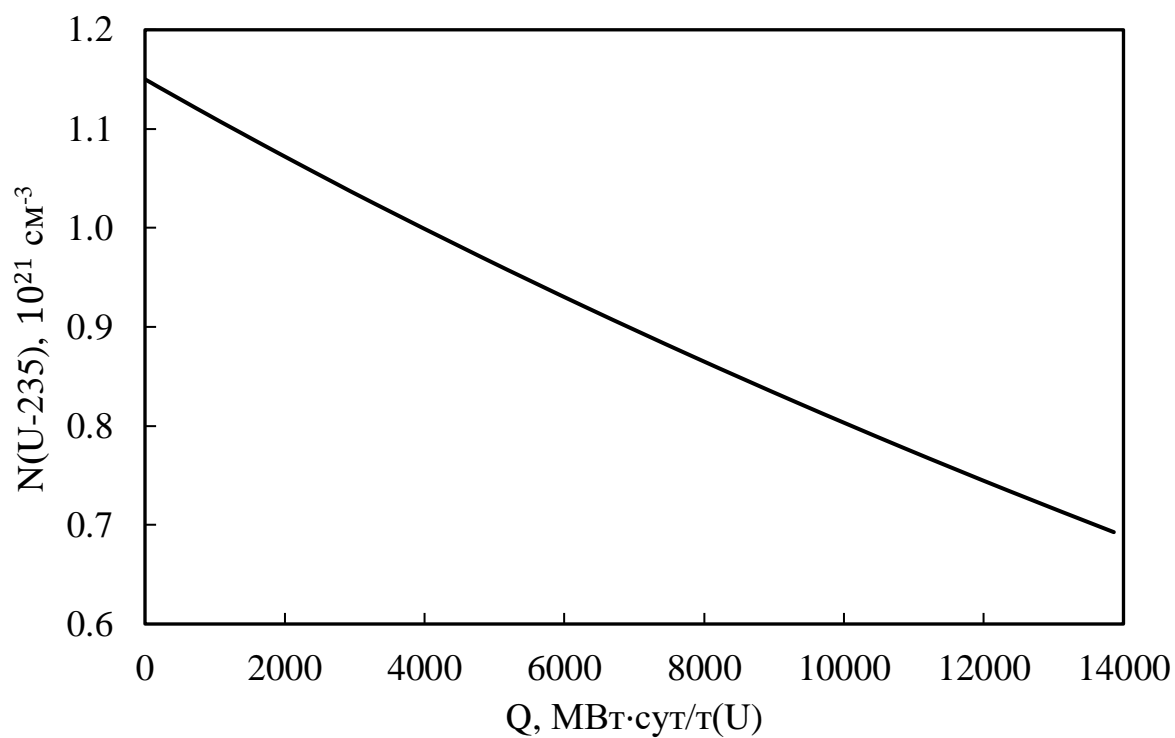


Рисунок 2.7 Изменение концентрации U^{235} от энергоснабжения

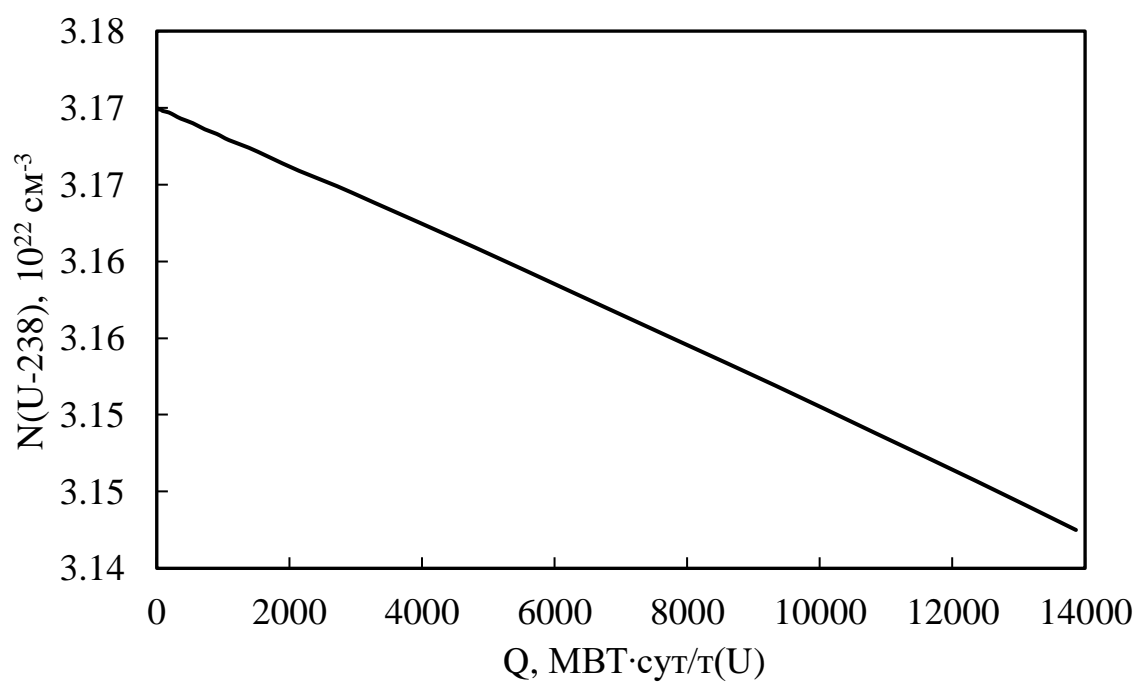


Рисунок 2.8 Изменение концентрации U^{238} от энергоснабжения

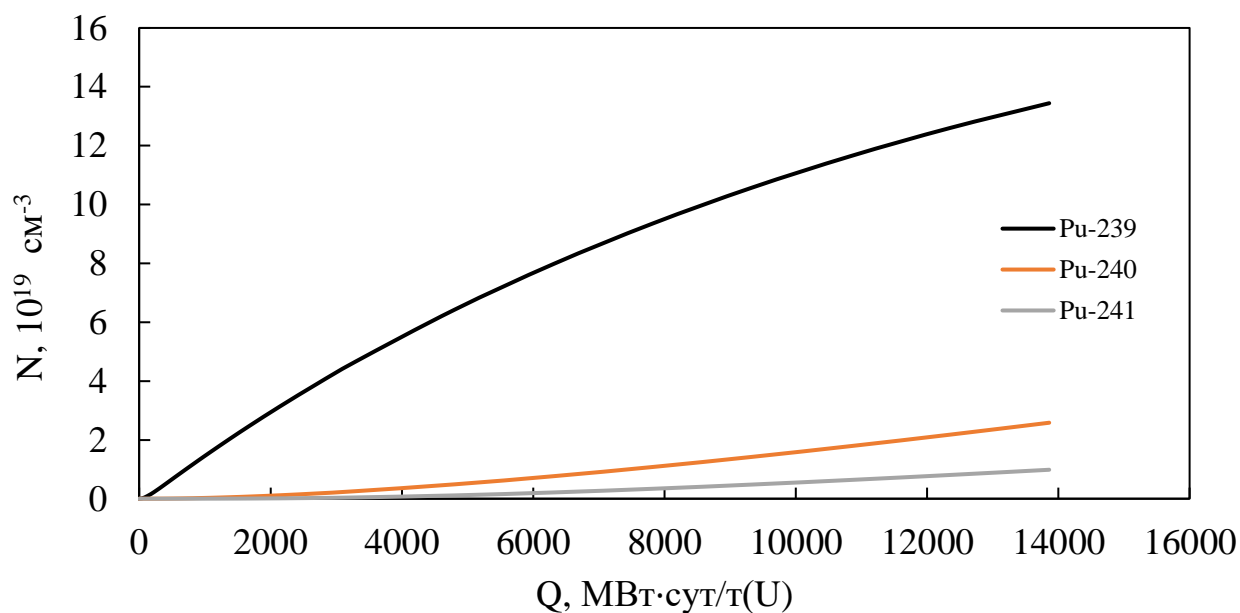


Рисунок 2.9 Изменение концентрации Pu^{239} , Pu^{240} и Pu^{241} от энерговыработки

Как видно из рисунка 2.9 концентрации Pu^{240} и Pu^{241} все время увеличиваются, а концентрация Pu^{239} увеличивается пока не дойдет до стационарного состояния.

2.8.2 Расчет «горячего» реактора

В приложении Г код, содержащий в себе входные данные, предоставляемые программе для расчета «горячего» реактора.

Полученное в результате расчетов значение бесконечного коэффициента размножения составило 1,1654.

Определим температурный коэффициент реактивности:

$$\alpha = \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = \frac{0,1419 - 0,1414}{860 - 400} = 0,0000012 \text{ K}^{-1}.$$

Температурный эффект реактивности:

$$\rho_T = \rho^{\text{гор}} - \rho^{\text{хол}} = 0,00052.$$

2.8.3 Расчет гомогенной ячейки

Для проведения данного расчета была построена гомогенная ячейка (гомогенизация 2 рода) в горячем состоянии, код которой представлен в приложении Д.

Рассчитаем кинетику изменения K_{∞} в зависимости от энергосработки, полученные результаты представлены на рисунке 2.10.

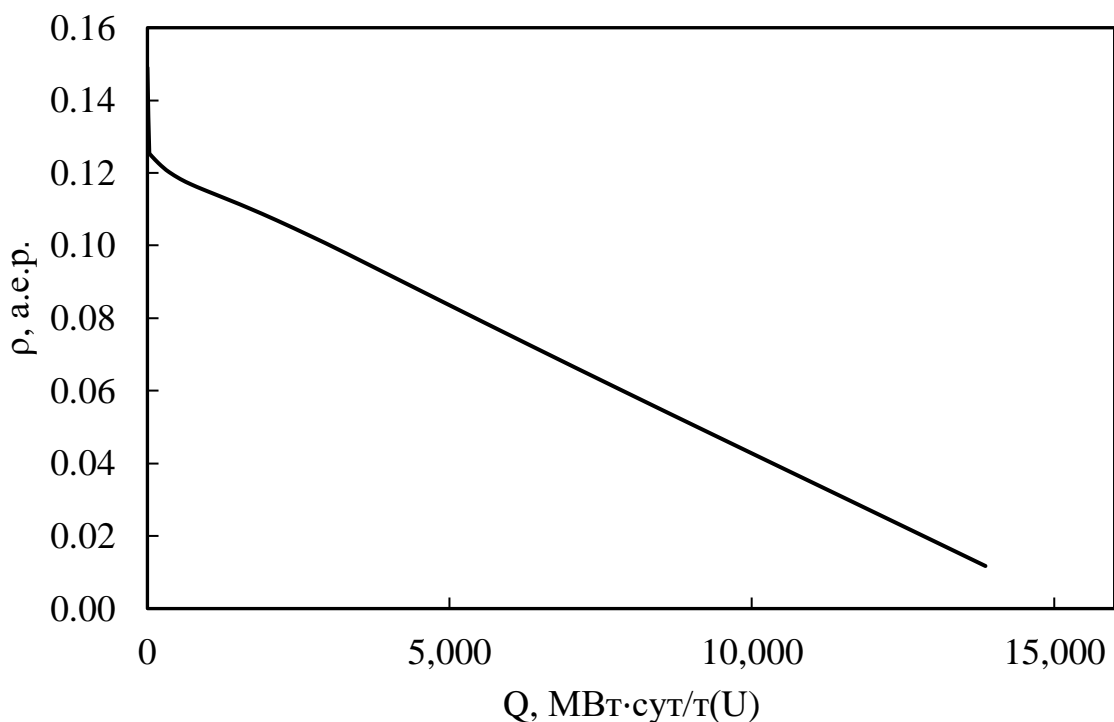


Рисунок 2.10 Зависимость реактивности от энергосработки

Для того чтобы построить более точные графики функций плотности потока быстрых и тепловых нейтронов по радиусу расчетной модели, фиктивный блок был разбит на 40 точек, а замедлитель на 10. 69 энергетических групп были свернуты в 3 группы, включающие быстрые, резонансные и тепловые нейтроны.

Результаты расчета представлены на рисунках 2.11 и 2.12.

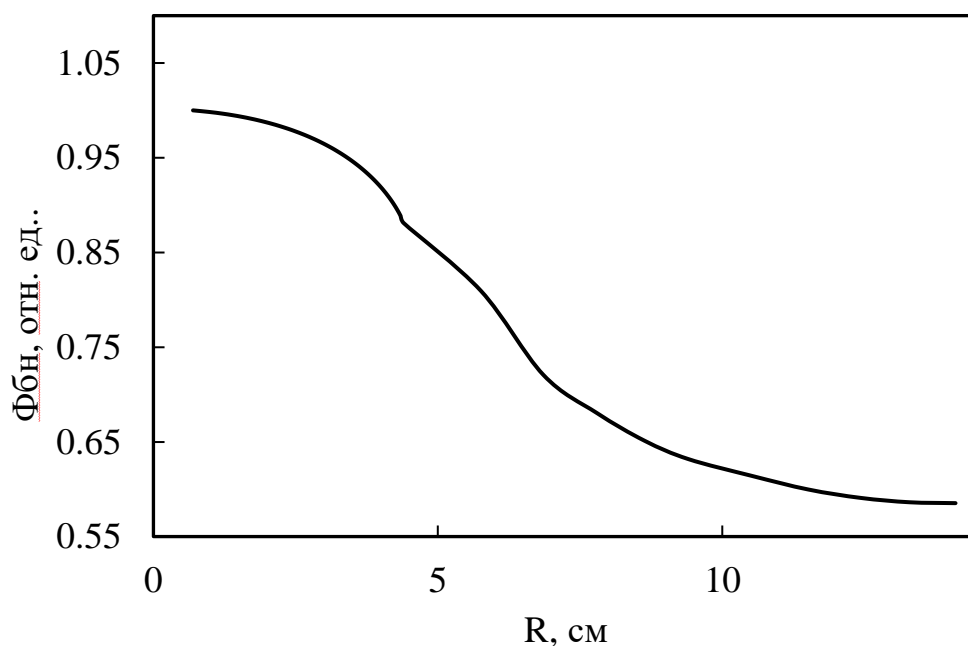


Рисунок 2.11 Плотность потока быстрых нейтронов по радиусу реактора

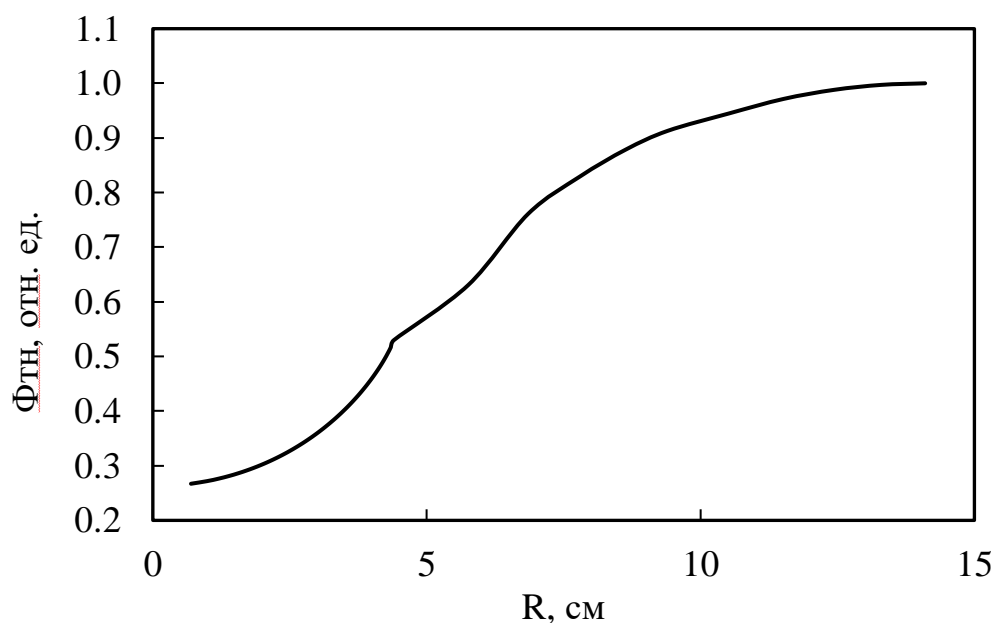


Рисунок 2.12 Плотность потока тепловых нейтронов по радиусу реактора

Из рисунков 2.11 и 2.12 видно, что плотность потока быстрых нейтронов уменьшается от центра фиктивного блока до конца замедлителя вследствие замедления нейтронов, а поток тепловых нейтронов наоборот увеличивается.

Далее был произведен расчет энерговыделения по радиусу фиктивного блока, результаты расчета представлены на рисунке 2.13.

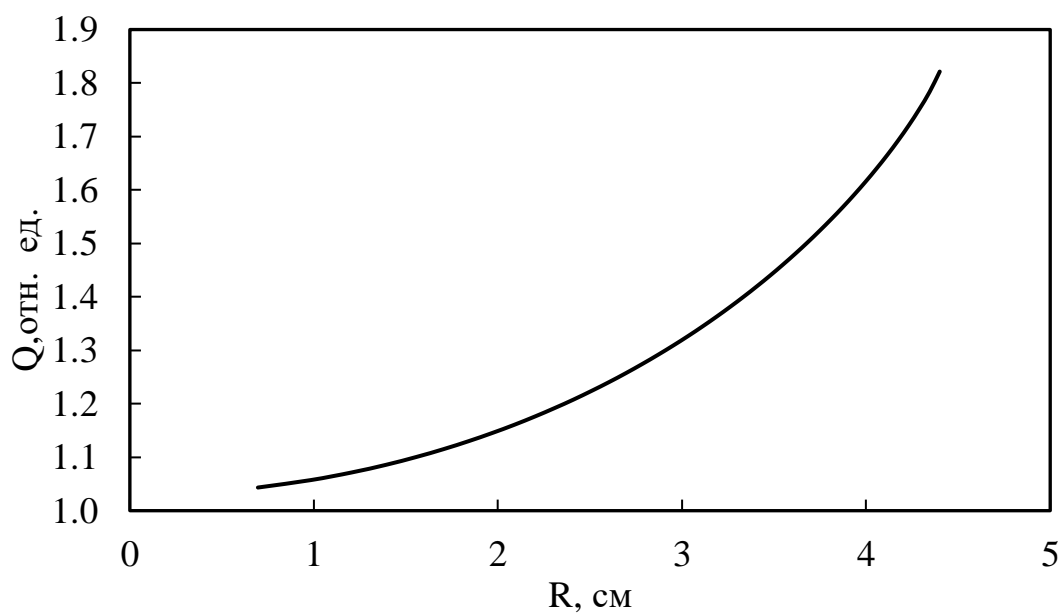


Рисунок 2.13 Распределение энерговыделения по радиусу фиктивного блока

Из рисунка 2.13 видно, что энерговыделение возрастает экспоненциально по мере приближения к границе фиктивного блока из-за диффузии тепловых нейтронов из замедлителя в фиктивный блок, которыми делится данное горючее.

2.9 Расчет ТЭР при различных условиях эксплуатации

Параметры гетерогенной ячейки были изменены до горячего состояния последовательным разогревом с шагом в 200 градусов. Результаты расчета ТЭР для последовательного разогрева гетерогенной ячейки представлены на рисунке 2.14.

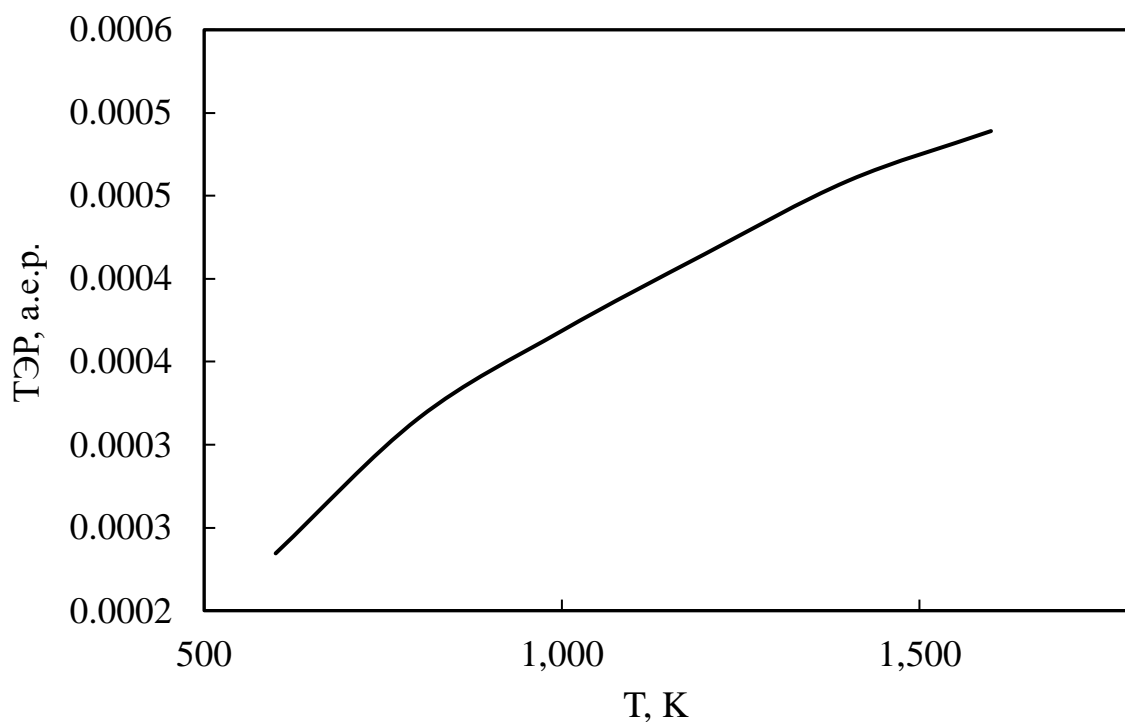


Рисунок 2.14 Зависимость ТЭР от температуры

Из рисунка 2.14 видно, что ТЭР с ростом температуры увеличивается, что соответствует кривой ТЭР 1 типа. Из данной зависимости следует то, что для эксплуатации данного реактора необходим жесткий контроль положительной обратной связи по данному параметру

Далее был проведен анализ зависимости ТЭР в начале кампании и в ее конце, которая изображена на рисунке 2.15.

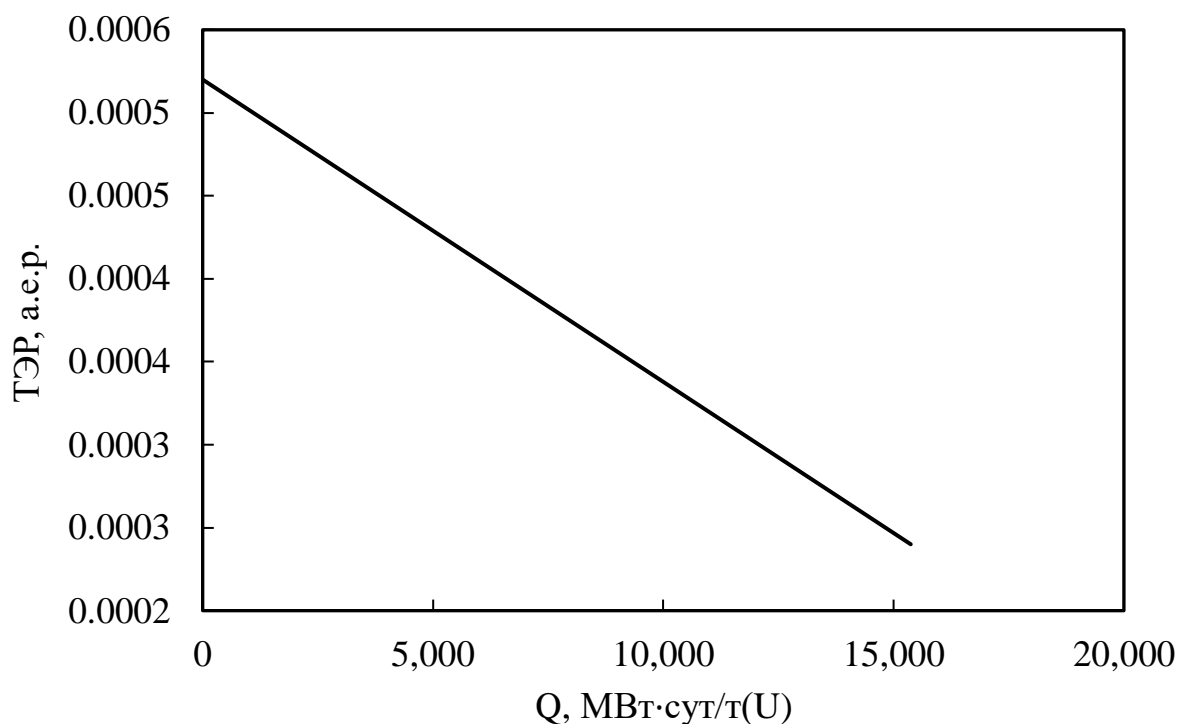


Рисунок 2.15 Зависимость ТЭР от энерговыработки

Из рисунка 2.15 видно, что влияние температурных эффектов в конце кампании меньше чем в ее начале.

2.10 Сравнение полученных данных

При выполнении работы произведены следующие расчёты: предварительный расчёт, одnogрупповой расчёт, расчёт в программе WIMS-D5B. Для наглядности результаты представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты расчётов

Параметр	Одnogрупповой расчёт	Расчёт в программе WIMS-D5B
K_{∞} в «холодном»	1,27	1,1647
$K_{эфф}$	1,07	-
ρ , %	6,54	14,1409
K_{∞} в «горячем»	1,32	1,1654
ТЭР, %	2,9	0,05
ТКР, K^{-1}	$6,46 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

На основе полученных данных можно сделать вывод, что реализованный вручную одnogрупповой расчет является менее точным по сравнению с многогрупповым, погрешность для «холодного» состояния составляет 9,41%, а для «горячего» состояния реактора 13,27%.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование (проект), а также дать приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы. Раздел должен быть завершен комплексной оценкой научно-технического уровня ВКР на основе экспертных данных.

3.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Для его построения хронологически упорядоченные вышеуказанные данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 30% И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор исходных параметров	НР, И	НР – 100% И – 70%
Методика расчета	НР, И	НР – 100% И – 80%
Нейтронно-физический расчет ЯР	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

3.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как исполнитель работы зачастую не располагает соответствующими нормативами, то используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя ВКР не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой ВКР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов.

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных значений продолжительности работ $t_{ОЖ}$ применяется по усмотрению исполнителя одна из двух формул.

$$t_{ОЖ} = \frac{3t_{\min} + 2t_{\max}}{5} \quad (3.1)$$

$$t_{ОЖ} = \frac{t_{\min} + 4t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (3.2)$$

где t_{\min} – минимальная продолжительность работы, дн.;
 t_{\max} – максимальная продолжительность работы, дн.;
 t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

Вторая формула дает более надежные оценки, но предполагает большую «нагрузку» на экспертов.

Для выполнения перечисленных в таблице 3.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель ВКР;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{\text{рд}} = \frac{t_{\text{ож}}}{K_{\text{вн}}} \cdot K_{\text{д}} \quad (3.3)$$

где $K_{\text{вн}}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вд}} - T_{\text{пд}}} \quad (3.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – календарные дни;

$T_{\text{вд}}$ – выходные дни;

$T_{\text{пд}}$ – праздничные дни.

При $T_{\text{кал}} = 365$, $T_{\text{вд}} = 52$, $T_{\text{пд}} = 10$.

В приложении Е пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле 3.1, при использовании формулы 3.2 необходимо вставить в таблицу дополнительный столбец для $t_{\text{проб}}$. Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента $K_{\text{д}} = 1,2$.

Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{д}}$. Столбцы 8 и 9 – трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{к}} = 1,212$. Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Величины трудоемкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленного в приложении Ё

3.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (i -го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Введем обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$ – общая трудоемкость проекта;
- TP_i (TP_k) – трудоемкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TP_i^H – накопленная трудоемкость i -го этапа проекта по его завершении;
- TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j -м участником на i -м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой:

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}} \quad (3.5)$$

Применительно к таблице (3.2) величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). $TP_{\text{общ}}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Пример расчета TP_i (%) и CG_i (%) на основе этих данных содержится в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	ТР _i , %	СГ _i , %
Постановка задачи	4,86	4,86
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	4,86	9,72
Подбор и изучение материалов по тематике	4,86	14,58
Разработка календарного плана	4,86	19,44
Обсуждение литературы	4,86	24,31
Выбор исходных параметров	4,86	29,17
Методика расчета	22,22	51,39
Нейтронно-физический расчет	27,08	78,47
Оформление расчетно-пояснительной записки	11,81	90,28
Оформление графического материала	4,86	95,14
Подведение итогов	4,86	100,00

3.1.3 Расчет сметы на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие (накладные расходы) расходы.

3.1.4 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в границах, представленных в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	250	1 уп.	250
Картридж для принтера	1550	1 шт.	1550
Итого:			1800

$$C_{\text{МАТ}} = 1800 \cdot 1,05 = 1890.$$

3.1.5 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, в его роли выступает исполнитель проекта, а также

премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083} \quad (3.6)$$

где 25,083 – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей неделе.

Пример расчета затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.4. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 3.1. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{пр}} = 1,1$; $K_{\text{доп.зп}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{и}} = K_{\text{пр}} \cdot K_{\text{доп.зп}} \cdot K_{\text{р}} ; \quad (3.7)$$

$$K_{\text{и}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699 .$$

Таблица 3.4 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	$K_{\text{и}}$	Фон з/п, руб.
НР	33664	1342,10	17	1,699	38764,00
И	15470	616,75	28	1,699	29340,14
Итого:					68104,14

3.1.6 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3; \quad (3.8)$$

$$C_{\text{соц}} = 68104,14 \cdot 0,3 = 20431,24.$$

3.1.7 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}}, \quad (3.9)$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $C_{\text{э}} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 3.1 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t, \quad (3.10)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{С}}, \quad (3.11)$$

где $P_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{С}} \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{С}} = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$, руб.
Персональный компьютер	224	0,3	386,3
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Итого:			387,42

3.1.8 Расчет амортизационных расходов

В данной статье представлен расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{д}}}, \quad (3.12)$$

где $H_{\text{А}}$ – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Например, для ПК в 2019 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне, F_d равен:

$$F_d = 298 \cdot 8 = 2384.$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

H_A определяется как величина обратная CA , в данном случае это:

$$H_A = \frac{1}{2,5} = 0,4$$

Зная значения всех коэффициентов, можно рассчитать:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 224 \cdot 60000 \cdot 1}{2384} = 2255,03.$$

3.1.9 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (C_{\text{МАТ}} + C_{\text{ЗП}} + C_{\text{СОЦ}} + C_{\text{ЭЛ.ОБ}} + C_{\text{АМ}}) \cdot 0,1. \quad (3.13)$$

Прочие расходы в нашем случае:

$$C_{\text{ПРОЧ}} = (1890 + 68104,14 + 20431,24 + 387,42 + 2255,03) \cdot 0,1 = 9117,78.$$

3.1.10 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа УГР тепловой мощностью 180 МВт».

Таблица 3.6 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{МАТ}}$	1890,00
Основная заработная плата	$C_{\text{ЗП}}$	68104,14
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{СОЦ}}$	20431,24
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$	387,42
Амортизационные отчисления	$C_{\text{АМ}}$	2255,03
Прочие расходы	$C_{\text{ПРОЧ}}$	9117,78
Итого:		102185,61

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 102185,61$ руб.

3.1.11 Расчет прибыли

Ввиду отсутствия данных, прибыль G рассчитана как 20 % от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0,2 = 20437,12; \quad (3.14)$$

$$G = 102185,61 \cdot 0,2 = 20437,12.$$

3.1.12 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (3.15)$$

$$\text{НДС} = (102185,61 + 20437,12) \cdot 0,2 = 24524,55.$$

3.1.13 Цена разработки ВКР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$\Pi_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (3.16)$$

$$\Pi_{\text{НИР}} = 102185,61 + 20437,12 + 24524,55 = 147147,28.$$

3.1.14 Оценка экономической эффективности проекта

Ввиду того, что данная разработка носит условно-проектный характер, и ее внедрение не предполагается, то оценка её экономической эффективности, в частности определение срока окупаемости данного проекта объективно невозможна в рамках представленной работы. Помимо этого, для оценки экономической эффективности такого рода проекта возможно возникнет необходимость привлечения специалистов в области оценки эффективности инвестиций.

4 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно, называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего, в определенных условиях, приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы ГОСТ 12.03.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, Отделение ЯТЦ НИ ТПУ	Воздействие ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы»
	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	—	Пожарная безопасность	Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.1.004-91

На студента, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

— физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;

- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 4.1.

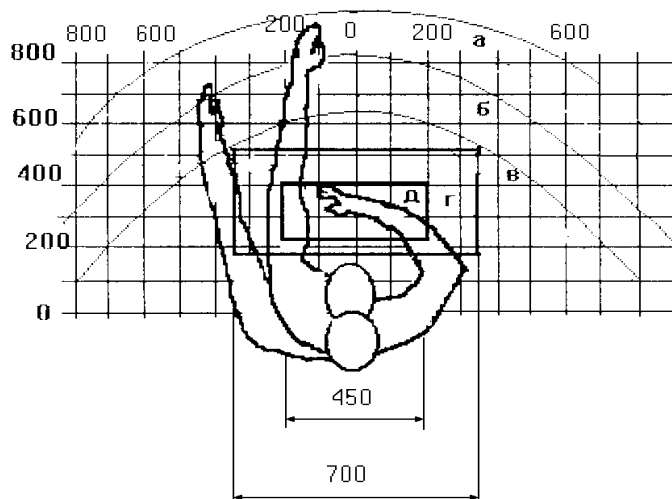


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони;
- г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

- документация: в зоне в (слева), легкой досягаемости ладони находится литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 - 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной не менее 500 мм, глубиной на уровне колен не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 - 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз студента на расстоянии 500 - 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на

уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23 - 25	40 - 60	0,1
Теплый	23 - 25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20 - 25°С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также

проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

При работе с компьютером использовался монитор, дисплей модуль которого изготовлен из жидкокристаллической матрицы.

Экран и системные блоки ПЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [10] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

4.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии

токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заклучение в корпуса электропоражающих элементов, токоведущих частей).

4.5 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ (Пожарная безопасность), в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

- Возможные причины загорания:
- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения

пожара от коротких замыканий, перегрузок и т.д., необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.
- При возникновении аварийной ситуации необходимо:
- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В ходе работы произведён предварительный и нейтронно-физический расчёт реактора типа УГР тепловой мощностью 180 МВт (геометрические размеры и общее устройство соответствует реактору РБМК-1000), результаты которого представлены ниже:

- скорость прокачки теплоносителя 0,93 м/с;
- бесконечный коэффициент размножения 1,27;
- эффективный коэффициент размножения 1,07.

С помощью оптимизации показано, каким образом возможно увеличение запаса реактивности данного реактора – увеличение размера ячейки, увеличение радиуса топливной таблетки.

После расчёта «холодного» реактора произведён расчёт «горячего» реактора в области рабочих температур одnogрупповым методом. В ходе расчёта получены следующие результаты:

- бесконечный коэффициент размножения нейтронов 1,32;
- эффективный коэффициент размножения нейтронов 1,137;
- температурный эффект реактивности 2,9 %;
- температурный коэффициент реактивности $6,46 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Многогрупповой расчёт реактора в программе WIMS-D5B показал следующие результаты: бесконечный коэффициент размножения 1,1647 для «холодного» состояния и 1,1654 для «горячего», для «горячего» гомогенного 1,175, температурный эффект реактивности 0,05 %, температурный коэффициент реактивности $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Ввиду закрытости данных относительно характера применения результатов данной разработки, оценка её экономической эффективности, в

частности определение срока окупаемости данного проекта объективно невозможна в рамках представленной работы.

В ходе выполнения работы были проведены обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.

Список использованной литературы

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Абагян Л.П. Групповые константы для расчета ядерных реакторов и защиты: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
3. Колпаков Г.Н., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах. Часть I: Учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 1997.
4. Бойко В.И. и др. Нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реактора на тепловых нейтронах: Учебное пособие /Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н. – Томск: Томский государственный университет, 2002.
5. Владимиров, В.И. Физика ядерных реакторов: практические задачи по их эксплуатации / В.И. Владимиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 480 с.
6. Савандер В.И., Увакин М.А. Физическая теория ядерных реакторов: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 152 с.
7. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: учебное пособие для вузов / Бартоломей Г. Г., Бать Г. А., Байбаков В. Д., Алхутов М. С – М., Энергоатомиздат, 1989. – 512 с
8. Беляев С. А., Кузьмин А. В. Методика теплового и нейтронно-физического расчётов реактора на тепловых нейтронах: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПИ им. С. М. Кирова, 1981. – 81 с.
9. Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Конструкция твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие/ Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск. Изд-во: ТПУ. 2009 г. – 118 с.

10. Коробейников В.В., Клинов Д.А. Введение в нейтронно-физический расчет ядерных реакторов. – Обнинск: ИАТЭ, 2000. – 108 с.
11. Wearne, S.H. UK experience of consortia engineering for nuclear power stations / S.H. Wearne, R.H. Bird – Manchester, The university of manchester dalton nuclear institute, 2016. – P. 32.
12. Chaplin R.A. Boiling water reactors / R.A. Chaplin // NUCLEAR ENERGY MATERIALS AND REACTORS. – 2010. – Vol. 1. – P. 8.
13. WIMSD-IAEA Library [Электронный ресурс] / Url: <https://nucleus.iaea.org/Pages/wimsd-iaea-library.aspx> – свободный. – Заглавие с экрана. – Яз англ. Дата обращения: 06.04.2019 г
14. Гурачевский, В.Л. Введение в атомную энергетику. Чернобыльская авария и её последствия / В.Л. Гурачевский. – Минск: институт радиологии, 2014. – 176 с.: ил
15. Тепломассообменное оборудование ТЭС и АЭС: учебное пособие / В.А. Суслов, В.Н. Белоусов, С.В. Антуфьев, Е.Н. Громова, А.Н. Кузнецов, В.А. Кучмин, С.Н. Смородин. – Спб.: СпбГТУРП, 2015 – 83 с: ил.
16. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие/ И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
17. Конотопский, В.Ю. Методические указания к выполнению раздела «Финансовый менеджмент, Ресурсоэффективность и ресурсосбережение» магистерских диссертаций для всех специальностей ИК: Учебно-методическое пособие / В.Ю. Конотопский – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 26 с.

18. Кукин П.П. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств: учеб. Пособие / П.П. Кукин, В.Л. Лапин – М., Высшая школа, 1999. – 318 с.
19. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон от 17 июля 1999 № 181 – ФЗ // Российская газ. – 1999. – 24.07. – [С. 4].
20. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.2.2.542-96; введ. 2003-06-30. – М: Российская газета, 2003. – 3 с.
21. ГОСТ 12.1.038-82. ССБТ. Электробезопасность [Текст]. – Введ. 1983-01-07. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 2 с.
22. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – Взамен СНиП 2.01.02-85; введ. 1998-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. – 6 с
23. Halsall M.J. A Summary of WIMSD4 Input Options // AEEW-M 1327, Reissued June 1980.
24. Гальченко В. В. Валідація бібліотек ядерних даних для коду WIMSD5B / В. В. Гальченко, А. А. Мішин, В. В. Муха, Н. М. Рабченко // Щорічна наук. конф. ІЯД НАНУ. — Київ, 2014. — С. 112—113.
25. WIMSD5, Deterministic Multigroup Reactor Lattice Calculations. NEA-1507/04. OECD, NEA Data Bank, France, 2004.
26. Упрощенная математическая модель и реализация остаточного ресурса ядерного топлива при выводе из эксплуатации реактора типа РБМК. Загребаев А.М., Залужная Г.А., Наумов В.И. Атомная энергия. 2018. Т. 125. № 5. С. 255-258.
27. Анализ последовательностей отказов для оценки уязвимости АЭС с реактором РБМК при экстремальных воздействиях. Мишукова О.Н., Голубков

А.В., Шиверский Е.А. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 246-249.

28. Structural investigation of RBMK nuclear graphite modified by $^{12}\text{C}^+$ ion implantation and thermal treatment. / Elena Lagzdina, Danielius Lingis, Artūras Plukisa, Rita Plukienė. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. Volume 444, 1 April 2019, Pages 23-32.

29. Экспериментальное исследование прочности графитовых блоков РБМК-1000. / Алишин М.И., Рахманов А.П., Решетин В.Л., Слободчиков А.В. В сборнике: Научно-технический годовой отчет НИКИЭТ-2017 Москва, 2017. С. 196-198.

30. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя во входном участке ТВС. / Дмитриев С.М., Добров А.А., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. № 3. С. 168-175.

31. Сборник нормативных материалов по безопасности АЭС. М.: Энергоатомиздат., 1985.

Приложение А

(обязательное)

Таблица А.1 – Микроскопические и макроскопические сечения для элементов конструкционных материалов, замедлителя и теплоносителя

Вид сечения	Na	Fe	Cr	Ni	TI	Mn	C(сталь)
σ_a , барн	0,39700	1,91300	2,250000	3,34000	4,400000	10,060000	0,003000
σ_c , барн	0,52500	2,53000	3,100000	17,0000	5,800000	13,300000	0
σ_s , барн	1,40000	11,4000	4,200000	15,6000	4,200000	2,1000000	4,700000
σ_{tr} , барн	1,75500	13,2000	6,410000	18,7009	8,550000	12,140000	4,420000
Σ_a , см ⁻¹	0,00965	0,11042	0,036788	0,03160	0,003019	0,0173063	0
Σ_c , см ⁻¹	0,01275	0,14594	0,050650	0,16081	0,003990	0,0228743	0
Σ_s , см ⁻¹	0,03401	0,65760	0,068623	0,14757	0,002889	0,0036117	0,000485
Σ_{tr} , см ⁻¹	0,04263	0,76145	0,104725	0,17769	0,005879	0,0208819	0,000456
ξ , ед.	0,08451	0,03529	0,037975	0,03352	0,041096	0,0359281	0,157895
$\xi\Sigma_s$, см ⁻¹	0,00287	0,02321	0,002606	0,00495	0,000119	0,0001298	0,000076

Приложение Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Гомогенизированные макроскопические сечения для элементов топлива, конструкционных материалов, замедлителя и теплоносителя

ВИД сечения	U235	U238	C (топл)	Na	Fe	Cr	Ni	C (зам)	Ti	Mn
$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	0,0819	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	0,0961	0,0187	0,00002	0,0047	0,0209	0,0069	0,00597	0,0004	0,0004	0,00327
$\Sigma_c, \text{см}^{-1}$	0,0196	0,0257	0	0,0062	0,0276	0,0096	0,03036	0	0,0023	0,00432
$\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	0,0029	0,0854	0,0455	0,0166	0,1242	0,0129	0,02786	0,3890	0,0020	0,00068
$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	0,0989	0,1041	0,0428	0,0208	0,1438	0,0198	0,03355	0,3659	0,0024	0,00394
$\xi, \text{ед.}$	0,0080	0,0084	0,1579	0,0845	0,0353	0,0379	0,03352	0,1579	0,0411	0,0359
$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	0,00002,	0,00072	0,00719	0,001401	0,00438	0,000492	0,0009339	0,061428	0,00008	0,00002

Приложение В
(обязательное)

CELL 7
SEQUENCE 1
NGROUP 4 2
NMESH 6
NMATERIAL 4 1
NREGION 3 10
NRODS 19 1 100 100 3 4 2
PREOUT
INITIATE
RODSUB 1 1 0.595 0
RODSUB 1 2 0.685 2
RODSUB 2 1 0.12 0
RODSUB 2 2 0.575 1
RODSUB 2 3 0.595 0
RODSUB 2 4 0.685 2
RODSUB 3 1 0.12 0
RODSUB 3 2 0.575 1
RODSUB 3 3 0.595 0
RODSUB 3 4 0.685 2
MATERIAL 1 -1 400 1 2235 0.00115 8238 0.0317 2012 0.03284
MATERIAL 2 -1 400 2 2056 0.0577 52 0.0163 58 0.00946 \$
48 0.000688 2012 0.000103 55 0.00172
MATERIAL 3 -1 400 3 23 0.0243
MATERIAL 4 -1 400 4 2012 0.0828
ANNULUS 1 4.2 3 2

ANNULUS 2 4.4 2 2
ANNULUS 3 14.1 4 2
MESH 2 2 2
ARRAY 1 1 1 0 0.
ARRAY 2 1 6 1.74 0.
ARRAY 3 1 12 3.05 0.78
NPIJAN 3
FEWGROUPS 5 15 45 69
POWERC 1 30.2 1 1
BEGINC
BEGINC

Приложение Г
(обязательное)

CELL 7

SEQUENCE 1

NGROUP 4 2

NMESH 6

NMATERIAL 4 1

NREGION 3 10

NRODS 19 1 100 100 3 4 2

PREOUT

INITIATE

RODSUB 1 1 0.595 0

RODSUB 1 2 0.685 2

RODSUB 2 1 0.12 0

RODSUB 2 2 0.575 1

RODSUB 2 3 0.595 0

RODSUB 2 4 0.685 2

RODSUB 3 1 0.12 0

RODSUB 3 2 0.575 1

RODSUB 3 3 0.595 0

RODSUB 3 4 0.685 2

MATERIAL 1 -1 860 1 2235 0.00115 8238 0.0317 2012 0.03284

MATERIAL 2 -1 860 2 2056 0.0577 52 0.0163 58 0.00946 \$

48 0.000688 2012 0.000103 55 0.00172

MATERIAL 3 -1 600 3 23 0.0222

MATERIAL 4 -1 600 4 2012 0.0828

ANNULUS 1 4.2 3 2

ANNULUS 2 4.4 2 2
ANNULUS 3 14.1 4 2
MESH 2 2 2
ARRAY 1 1 1 0 0.
ARRAY 2 1 6 1.74 0.
ARRAY 3 1 12 3.05 0.78
NPIJAN 3
FEWGROUPS 5 15 45 69
POWERC 1 30.2 1 1
BEGINC

Приложение Д
(обязательное)

CELL 6
SEQUENCE 1
NGROUP 3
NMESH 50
NMATERIAL 3 1
NREGION 3
INITIATE
ANNULUS 1 4.4 1 40
ANNULUS 2 9.4 2 5
ANNULUS 3 14.1 3 5
MESH 40 5 5
MATERIAL 1 -1 860 1 \$
2235 0.000339 \$
8238 0.00935 \$
23 0.0108 \$
2056 0.0109 \$
52 0.00308 \$
58 0.00178 \$
48 0.000129 \$
2012 0.0097
MATERIAL 2,-1,600.,3,2012,0.0828
MATERIAL 3,-1,600.,3,2012,0.0828
S 32
FEWGROUPS 19 40 69
POWERC 1 30.2 1

Приложение Е

(обязательное)

Таблица Е.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	2	4	2,8	3,36	–	4,07	–
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,4	2,88	0,29	3,5	0,35
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	12	15	13,2	4,75	15,84	5,75	19,16
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	3,36	0,33	4,07	0,39
Обсуждение литературы	НР, И	3	6	4,2	1,51	5,04	1,83	6,1
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	7	14	9,8	11,76	8,23	14,25	9,9
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	6	9	7,2	8,64	6,91	10,47	8,36
Расчет принципиальной схемы устройства	И	8	14	10,4	–	12,48	–	15,1
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	6	9	7,2	–	8,64	–	10,45
Оформление графического материала	И	5	6	5,4	–	6,48	–	7,84
Подведение итогов	НР, И	5	8	6,2	4,46	7,44	5,4	9
Итого:				71,6	40,54	63,01	49,34	86,65

Приложение Ж

(обязательное)

Таблица Ж.1 – Линейный график работы

Этап	НР	И	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42
1	2,04	-														
2	2,04	0,20														
3	0,61	2,04														
4	2,04	0,20														
5	0,61	2,04														
6	2,04	1,43														
7	9,31	7,45														
8	-	11,34														
9	-	4,94														
10	-	2,04														
11	1,22	2,04														

НР – ; И